

*Application Note***F28P55x および F28P65x 向け、デジタル電源アプリケーション用、電力計測ライブラリ (E-Metrology) ユーザー ガイド**

Ira Thete
Akshit Pareek

ASM Industrial Applications
ASM Industrial Applications

概要

現代の電気システムは、複雑な波形のリアルタイム処理や計算集約型アルゴリズムを含む、従来型のマイコンにとっては挑戦となるような、高精度の計測と電力品質 (PQ) の包括的な解析を必要とします。このアプリケーション ノートでは、内蔵された 32 ビット浮動小数点ユニット (FPU32)、三角関数演算ユニット (TMU)、および固有の DSP 機能を特に活用してこの課題を克服する、テキサス・インスツルメンツの C2000™ リアルタイム マイクロコントローラ向けに最適化された、計測ソフトウェア ライブラリを紹介します。このライブラリは、RMS 電圧および電流の正確な値、多相の有効電力と無効電力、皮相電力と皮相電力量、力率、ライン周波数、サグ / スウェル検出、高精度 FFT ベースの全高調波歪み (THD) など、豊富な高精度測定セットを提供します。これらはすべて、高精度の 32 ビット浮動小数点演算を使用して計算されます。効率的な分割アーキテクチャにより、タイム クリティカルなバックグラウンド データの累算 (概念的には ADC 割り込みが駆動) を複雑なフォアグラウンド演算から分離することで、最適なパフォーマンスが維持されます。本稿では、C2000 マイクロコントローラの特長であるネイティブ浮動小数点 FFT 処理と専用 DSP 命令の有効性を示し、厳しい条件が要求される計測アプリケーションや PQ アプリケーションで優れた性能と精度を実現することを明らかにします。

目次

1はじめに.....	2
2ライブラリアーキテクチャ.....	3
3測定値の計算.....	4
4構成とデータ構造.....	4
5較正モジュール.....	4
6アプリケーションと使用事例.....	5
7役立つリンク.....	6

商標

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

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

スマートグリッド、再生可能エネルギーの統合、高度な産業用オートメーションなどの最新の電気インフラの進化により、電気的パラメータ測定の精度と包括性に対する要求がますます厳しくなっています。正確な測定(計測学)はもはや、基本的な電力消費量の測定だけに留まりません。現在の計測学には、グリッドの安定性、機器の耐用期間、運用効率を維持するために不可欠な詳細な電力品質(PQ)分析が含まれています。RMS 電圧と RMS 電流、有効 / 無効電力、力率、周波数、高調波歪みなどのパラメータにより、電気システムの健全性と性能に関する重要な洞察が得られます。ただし、堅牢な計測設計と PQ 分析設計を実装すると、技術的に大きな障壁が生じます。現代の電気負荷は多くの場合、非線形であり、電流や電圧の波形が歪んだ高調波を多く含むものです。これらの複雑な信号をリアルタイムで高精度処理すると同時に、高調波分析のための高速フーリエ変換(FFT)や、真の RMS と電力計算のための高精度のドット積蓄積などの演算集中型アルゴリズムを実行すると、従来のマイコンの処理能力の限界に達します。さらに、計測規格で要求される高精度を達成するには、多くの場合、浮動小数点演算が必要となり、特にリソース制約のある組込みプラットフォームでは、設計の複雑さが増します。

2 ライブラリ アーキテクチャ

継続的な電力監視の厳格なリアルタイム要件を満たすために、重要なデータが失われないように、この計測ライブラリでは効率的な分割処理アーキテクチャが採用されています。この設計では、時間に制約のあるタスクを、それほど頻繁に使用されないけれども計算量が多い計算から分離し、リソースの使用率を最適化し、システムの応答性を維持します。このアーキテクチャは、バックグラウンド処理とフォアグラウンド処理という2つのメイン処理レイヤに大きく分けられています。

バックグラウンド処理:

高周波数で実行され、通常、A/D コンバータ (ADC) のサンプリング レートと同期します。バックグラウンド処理タスクは、割り込みサービスルーチン (ISR) 内で処理されます。このレイヤの主な役割は次のとおりです。

1. 未加工サンプルの取得: ADC から電圧と電流の最新のサンプルを読み取ります。
2. 基本的な前処理: DC 推定や DC フィルタリングなど、未加工サンプルに対する最小限のタイム クリティカルな処理を実行して、DC バイアスを除去します。
3. コアの累算: 定義された測定ウィンドウ (通常は電源の 1 周期または複数の周期) 全体にわたる基本ドット積 (電圧サンプルの 2 乗の合計、電流サンプルの 2 乗の合計、電圧と電流の積の合計など) の計算とその累算。これらの累算データが、以後のほとんどの計測学の計算の基礎になります。
4. データバッファと累算器: データバッファの管理と、フォアグラウンド処理への安全な転送のために、累算データの準備。

バックグラウンド処理の重要な設計原理は、ISR の実行時間をできるだけ短くし、高いサンプリング忠実度を維持し、システムが他の重要な割り込みに応答できるようにすることです。

フォアグラウンド処理:

メイン アプリケーション ループ内で低い周波数で動作する場合、バックグラウンド処理によりデータのブロック全体が累算されると、フォアグラウンド処理のタスクがトリガれます。このレイヤでは、次のような演算集中型の計算が処理されます。

1. 累算データの取得: バックグラウンド処理のタスクによって記録されたドット積や他の関連データを一貫して安全に読み取ります。
2. キャリブレーションの適用: センサの誤差とアナログ フロントエンドの変動を補償するため、あらかじめ決められた較正係数を使用して未加工の累算値を補正します。
3. 最終パラメータの計算: RMS 電圧と RMS 電流、有効電力、無効電力、皮相電力、力率、周波数、THD、サグ / スウェル / イベントなどの計測パラメータ全体を、キャリブレーション済みのデータを使用して計算します。
4. 電力量の累算: 時間の経過に応じて電力値を積分し、電力消費量を計算します。結果の更新: ディスプレイ、ロギング、通信のためにアプリケーションで最終的な較正測定値を使用できるようにします。

データ転送メカニズム:

この分割アーキテクチャにおける重要な要素として、バックグラウンド ISR とフォアグラウンド タスク間の堅牢なデータ転送メカニズムがあります。このライブラリは、データの整合性を維持するために、ダブル バッファリングと呼ばれる同期ハンドオフ技術を採用しています。処理の内容は以下のとおりです。

1. バックグラウンド ISR は、1つ1つのサンプル データに基づきメインの累算器セットを常に更新します。
2. 完全な計測ブロック (たとえば、定義されたサンプル数または主電源サイクル) が累算されると、バックグラウンド タスクにより、現在の値がこれらの1次の累算器から2次の「ログ」に記録される変数セットにコピーされます。
3. バックグラウンド タスクによってステータス フラグが設定された後、フォアグラウンド タスクに対して、「ログ」に記録される変数に新しいデータ ブロックが準備されたことが通知されます。
4. メイン アプリケーション ループで動作するフォアグラウンド タスクは、このステータス フラグを定期的にチェックします。フラグの設定が検出されることにより、「ログ」に記録される累算器において、完全かつ一貫性のあるデータセットが使用可能になったことが分かります。その後、このデータを計算に使用します。

3 測定値の計算

実際の測定値の計算は、*meteology_calculations.c* ファイルで行われます。

1. このモジュールには、計測アルゴリズムを実装する数学関数ライブラリが含まれています。
2. このモジュールは、ドット積、サンプル数、キャリブレーションデータの累算値などの入力を受け取ります。
3. このモジュールは、電気的パラメータ (*calculateRMSVoltage*、*calculateActivePower*、*calculateFrequency_PLL* など) の計算値を出力します。

4 構成とデータ構造

1. これらのファイルは、定数 (電圧 / 周波数の公称値、サンプルレートなど)、機能を有効にするプリプロセッサ マクロ (例: *HARMONICS_SUPPORT*、*NEUTRAL_MONITOR_SUPPORT*)、およびすべての計測関連情報を格納する主要なデータ構造を定義します。
2. *meteologyData*: トップレベルのグローバル構造体。インスタンスは、すべての相、中性線、合計値、およびシステム状態のすべてのデータを保持します。
3. *phaseMetrology / neutralMetrology*: 各相および中性線のパラメータ (*params*) と読み取り値 (*readings*) を保持する計測データ内の構造体です。
 - a. *params*: 構成情報、バックグラウンドの中間累積情報 (*dotProd* 配列など)、キャリブレーションから派生した値、および状態変数 (PLL、サゲ / スウェルなど) を格納します。
 - b. *readings*: 最終的に計算された計測値 (RMS、電力、PF など) を格納します。
4. *calibrationData* (*meteology_nv_structs.h*): 較正係数を保持します。

5 較正モジュール

1. キャリブレーションデータの読み込み、適用、保存 (概念として) を管理します。
2. *Meteology_setup_init* (または *meteology_setup.c* 内の同様の関数) は、データ構造を初期化し、位相補正などの較正の初期設定を適用します。

6 アプリケーションと使用事例

この C2000 ベースのライブラリを使用した計測パラメータの計算は、デジタル電源の分野だけでなく、さまざまな分野のアプリケーションに利用されています。こうしたアプリケーションのいくつかの例を以下に示します。

1. スマート電気メーター

- 課金の精度:複数の相にわたる RMS 電圧、電流、有効電力 (Wh)、無効電力 (VARh)、皮相電力 (VAh) を高精度で測定することにより、住宅、商業、産業分野の消費者に対して、公正かつ正確な課金が維持されます。
- 電力品質モニタリング:サグ / スウェル検出機能と THD 分析機能を内蔵することで、電力事業者がグリッドの状態を監視したり、消費者が供給電力の品質を理解するための有益なデータが提供されます。このデータはログに記録され、レポートとして出力できます。
- 負荷プロファイリング:詳細な電力消費量パターンを記録でき、電力事業者は需要側管理を強化し、消費者は電力使用量を最適化できます。

2. 電力品質分析器 (PQA)

- 包括的なイベント検出:ライブラリに含まれるサグ検出とスウェル検出は、電力品質分析器 (PQA) の基礎的な機能です。イベントの持続期間と大きさをログに記録することで、詳細なイベント分析が可能になります。
- 高調波分析:FFT に基づく THD 計算 (`vTHDfft`, `iTHDfft`) と、その基礎となる `find_harmonics` 関数 (`metric/metrication_calculation.c` に含まれる) により、機器の過熱や干渉などの問題診断に不可欠な、特定の高調波次数とその大きさを特定するためのスペクトルデータが得られます。

3. 産業用オートメーションおよび制御

- モーター監視および保護:大型モーターの電流、電力、効率、および THD を監視することで、故障を予測し、効率を最適化し、位相不均衡や過負荷などの異常状態から保護できます。
- エネルギー管理システム (EMS):工場や大規模施設では、このライブラリをサブメータリング ユニットの中核として使用することで、セクションまたは機器ごとの電力使用量の詳細データを取得し、ターゲットを絞った省エネルギーの取り組みを可能にします。

4. 再生可能エネルギー システム

- ソーラーインバータ:グリッド接続型ソーラーインバータでは、グリッドコードに準拠し、電力注入を最適化するために、AC 出力電圧、電流、周波数、電力、THD を監視することが不可欠です。
- エネルギーストレージシステム:電力フロー (インポート / エクスポート、電力量累算ロジック対応) および電力品質を測定することは、エネルギーストレージ アプリケーションにおけるバッテリ管理とグリッド接続に不可欠です。

5. 電気自動車 (EV) の充電ステーション

- 正確な電力供給量:課金の際は、EV に供給される電力量を正確に測定することが重要です。
- 電力品質への影響:ライブラリの全高調波歪み (THD) 検出機能とサグ / スウェル検出機能を使用して、オフボード EV 充電がローカルグリッドに及ぼす影響を監視することができます。すなわち、高調波注入や電圧安定性を含めて、その影響を監視することができます。
- スマート充電:リアルタイムの電力データは、グリッドの状態や電気の価格に基づいて充電レートを調整するスマート充電アルゴリズムを可能にします。

6. データセンター

- パワー ディストリビューション ユニット (PDU):データセンターの PDU では、容量計画、課金、効率の最適化 (たとえば、Power Usage Effectiveness — PUE) のために、ラックレベルまたはサーバレベルでの消費電力を正確に監視する必要があります。
- 入力電力品質:高感度な IT 機器への電力供給の質を維持することが重要です。ライブラリは、サーバーの信頼性に影響を与える可能性のある、たるみ、うねり、高調波を監視できます。

C2000™ マイコンのリアルタイム処理機能と、この計測ライブラリ内の包括的なアルゴリズムの組み合わせにより、これらのアプリケーションに適した汎用プラットフォームが実現します。

7 役立つリンク

E-Metrology ライブドリにに関するリンクは、[こちらをご覧ください](#)。ユーザー構成、ライブラリのメモリ使用状況、これらの計測パラメータの計算方法の背後にある理論などの詳細について説明しています。また、このページには E-Metrology ライブドリをダウンロードするためのリンクも記載されています。

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默示保証、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、明示的または默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、(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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025年10月