

Technical White Paper

テキサス インスツルメンツの新しい変調手法によりトラクション システムの効率を最適化



Osamah Ahmad

1 エグゼクティブ サマリー

自動車メーカー各社は積極的な電動化目標を達成しており、自動車の電動化は世界各地で加速を続けています。ただし、効率の改善による EV コストの低減は引き続き重要な課題であり、OEM と Tier-1 サプライヤにとって重視されています。

現在の最新のトラクション インバータ システムでは、空間ベクトル パルス幅変調 (SVPWM) 技術のバリエーションを使用しています。SVPWM はシンプルで効果的でよく理解されていますが、同期最適パルス パターン (OPP) ベースの変調で効率を向上させることができます。最適パルス パターンの概念は、コンバータのスイッチング周波数が非常に限られていたサイリスタの時代以来よく知られています。ただし、EV トラクション システムに OPP 変調を適用するには、既存のマイコンの処理能力やペリフェラル能力を克服するのに苦労するいくつかの基本的な課題を考慮する必要があります。TI は、最適なパルス パターン (OPP) 実装において、F29x マイコン独自のペリフェラル機能と比類のない処理能力を活用することで、これらの基本的な課題に対処しています。暫定的な大電力テストの結果は、トラクション システムの効率が 0.8% 向上し、EV メーカーのバッテリー パック 1 個あたりの \$100 を上回る節約が可能になりました。

このホワイト ペーパーでは、トラクション インバータ最適化の重要性、OPP によってシステム レベルの有意義な利点を実現する方法、TI の F29x マイコンが OPP の実装において実際の課題にどのように対処するかについて説明します。

2 トラクション システムの効率が重要な理由

トラクション システムは EV バッテリーのエネルギーを消費する主要な消費者であり、EV バッテリーは EV の最もコストの高いコンポーネントです。このため、これらの OEM の主要な目標を達成するうえでトラクション システムの効率向上が最も効果的な方法です。

表 2-1. OEM の目標と設計に関する一般的な課題

OEM の目標	目標を達成するための技術設計上の課題
バッテリー サイズと車両コストを低減	トラクション システム効率を改善
消費者の期待に応えるために航続距離を延長	

OPP の影響を受けるトラクション システムの効率に影響を及ぼす 2 つの要素は次のとおりです。

- パワー半導体のスイッチング損失
- モーターの導通損失と高調波損失

TI の独自の OPP 設計は、スイッチング損失とモーターの高調波損失の両方を最小化する優れたスポットを見つけ、トラクション システムの効率を最適化します。

3 最適なパルス ポジショニング:新しい変調方式

変調とは、スイッチのオンとオフを正確に切り替え、DC バッテリから AC 波形を生成するプロセスです。スイッチングが高速なほど、よりクリーンな正弦波形を実現できますが、スイッチングするたびに FET で損失が生じるため、スイッチング損失が増加します。スイッチングが遅いと、正弦波の歪みによるモーターの高調波損失が発生します。適切に設計された変調手法により、車両の性能や運転体験を損なうことなく、スイッチング損失とモーター高調波損失の両方をドライブ サイクル全体にわたって最適化できます。

先に説明した従来の変調手法である SVPWM は、PWM 周期内にあらかじめ決められた数のエッジを使用します。OPP は可変スイッチング周波数を使用し、1 つの PWM 周期内に複数のスイッチング イベントおよびエッジを持つことができます。これは基本的に、OPP による有意義な効率向上の可能性を引き出します。図 3-1 は、OPP 波形と SVPWM 波形を比較し、変調と複雑さの違いを強調します。

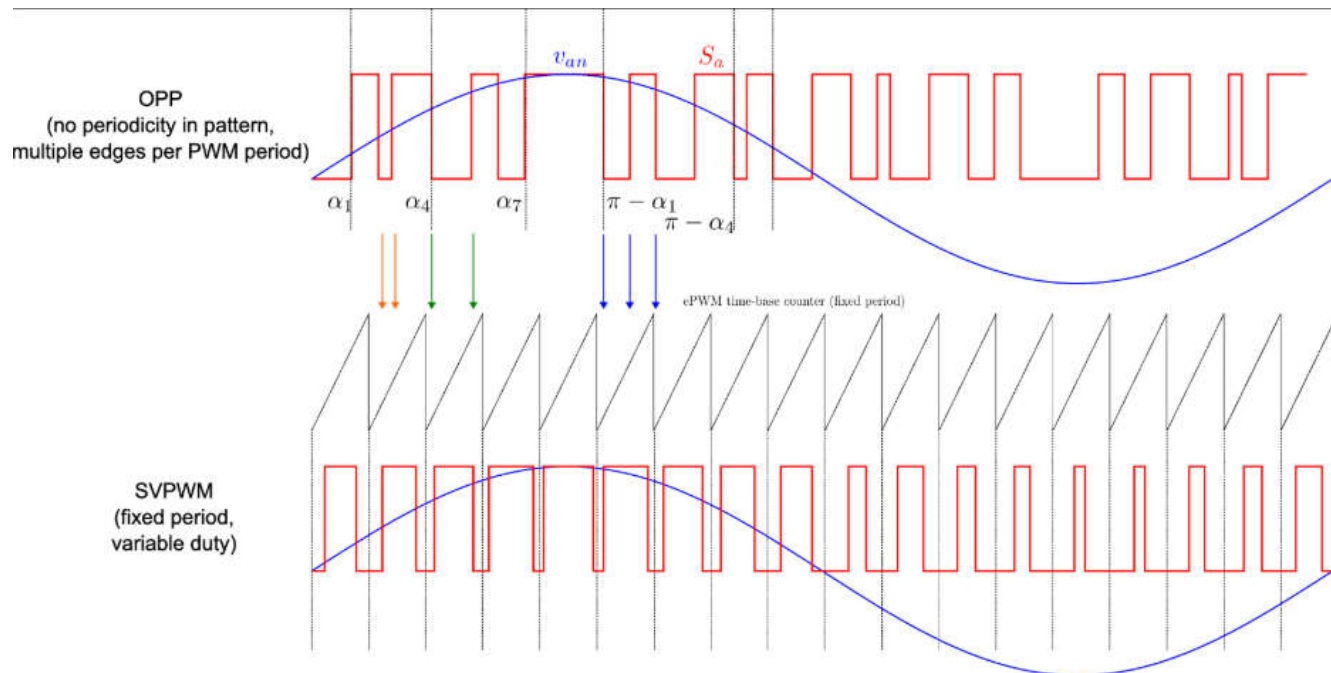


図 3-1. 最適なパルス パターン波形と空間ベクトル変調波形の関係

OPP は、より低いスイッチング周波数での動作を可能にすると同時に、モーターの高調波を最小化しますまた、OPP を使用すると、EV バッテリの効率的な利用が可能になり、銅損 (モーター損失の要因) を減らすことができます。どちらも、システム全体の損失を最適化できます。次の図はこれを反映しています。

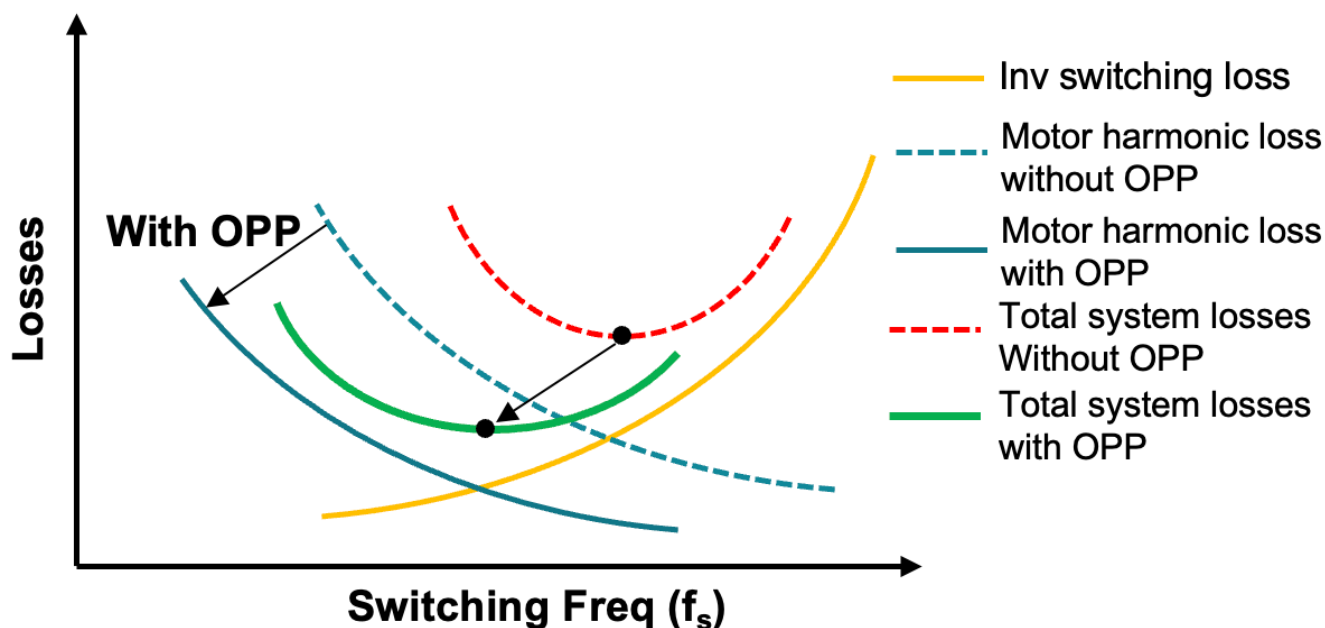


図 3-2. OPP によりシステム全体の損失が低減

4 OPP を実装するための主な課題と、TI がそれらを解決した方法

堅牢な OPP ソリューションを実装するには、次の 3 つの複雑な課題があります。

1. 同期 PWM パルス生成
2. SVPWM から OPP への遷移
3. 動的応答と堅牢な閉ループ制御

これらの課題に伴い、業界をリードするリアルタイム制御の性能と独自の機能をサポートする、差別化されたマイコンが必要になります。TI の OPP 設計は、F29x リアルタイム マイコンにより、これらの課題を解決しました。これらを実現する F29x マイコンの主な機能は次のとおりです。

- リアルタイム モーター制御向けに最適化済みの高性能 C29 CPU コア
- タイプ 5 ePWM により、高精度のエッジ配置、1 つの PWM 周期内の複数のエッジ、アクティブ レジスタとシャドウ レジスタ機能が可能になります
- 緊密に結合された CPU-PWM により、CPU のオーバーヘッドを最小化

5 同期 PWM パルス生成

すでに説明したように、OPP 波形は、PWM 周期内のより高い比較イベント (エッジ) を必要とする場合があります。F29 マイコンのタイプ 5 ePWM モジュールは、XCMP 機能を搭載しており、PWM 周期ごとに複数の比較イベントをサポートすることで、OPP を実現できます。図 5-1 に、1 つの PWM 周期内の 4 つの XCMP イベント (4 つのエッジ) を示します。この機能がない場合、競合他社のマイコンは、PWM 期間内の独立エッジの数が減るという制約があり、特に低速の場合に OPP を動作させる能力が制限されているので、効率は表上にとどまります。

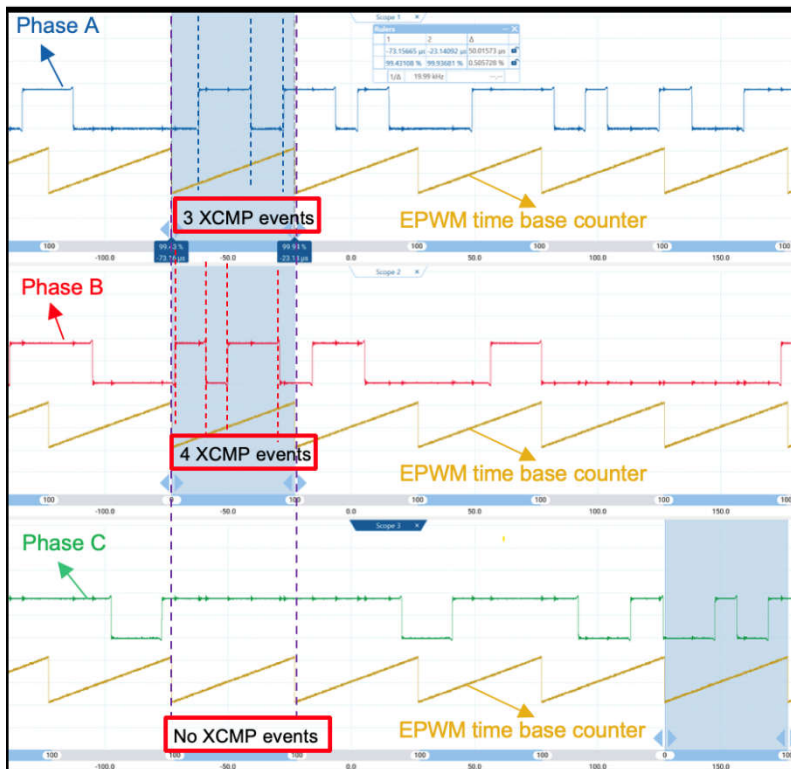


図 5-1. 単一 PWM 周期内の複数の XCMP イベントまたはエッジ

正確なエッジ配置も、同期 PWM パルス生成の重要な要素です。PWM エッジの配置でわずかな誤差は、モーターの高調波損失につながります。この問題を解決する F29 マイコンの主な差別化要因は 2 つあります。

- C29 性能は、配置する必要のあるエッジの数、正確なタイミングに関する計算の要求に対応します。
- CPU と PWM の緊密なインターコネクト: PWM の更新に必要な CPU サイクルを最小限に抑えます

CPU は比較イベントごとに PWM レジスタに書き込む必要があるため、単一の PWM 周期に複数のエッジが存在する場合、かなりの CPU 帯域幅が必要となる可能性があります。ただし、C29 CPU から PWM インターコネクトへのレイテンシは非常に短いため、PWM 比較イベントの要求に対応するために必要な CPU サイクルは最小限で済みます。これにより、複数の PWM レジスタへの書き込みによる CPU 帯域幅損失という懸念が実質的に解決できます。

6 SVPWM から OPP への遷移

空間ベクトルパルス幅変調 (SVPWM) から OPP への遷移は非常に複雑です。低速 (起動時) 時には、効率を最大化するためにシステムが SVPWM モードで動作する必要があるため、最初にこの遷移が必要です。ただし、モーター速度が上がるにつれて、効率を維持するために OPP に遷移する必要があります。さらに、F29 の別のタイプ 5 ePWM 機能 (シャドウレジスタとアクティブレジスタ) によって、あるモード (SVPWM) から別のモード (OPP) へのスムーズかつシームレスな遷移が有効化されます。シャドウレジスタとアクティブレジスタにより、SVPWM と OPP 構成を同時に共存させ、PWM 再構成を有効化および即座に実行できます。次の画像は、SVPWM から OPP への遷移の問題を解決するためのタイプ 5 ePWM の実装を示しています。

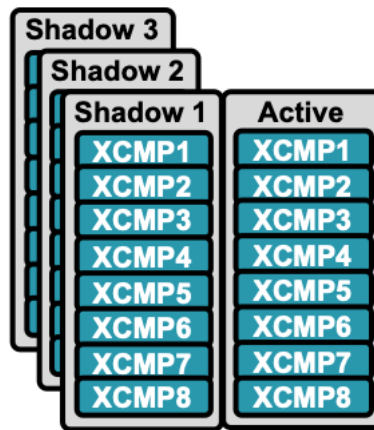


図 6-1. シャドウレジスタとアクティブレジスタの表示

7 動的応答と堅牢な閉ループ制御

良い状態を望むことはできるが、現実世界のシステムは常に周期的な異常や外乱をもたらす。モーター電流は、以下のいずれかの要因によって乱される可能性があります。

- SVPWM から OPP への遷移
- OPP パルス数の変更
- トルク要求変更 (ドライバ入力)

包括的で堅牢な OPP 設計を実現するには、これらの各ケースに対応する閉ループとアクティブ制御が非常に重要です。

アクティブ制御は、従来型 FOC (フィールドオリエンテッドコントロール) だけでは実現できないため、フラックス制御が必要です。フラックス制御は非常に複雑で、次の 3 つのサブ課題が発生します。

- フラックスリファレンス: フラックスが何である必要があるか。
- フラックスオブザーバ: 実際のフラックス。フラックスを測定できないため、これは困難です。
- フラックスコントローラ: フラックスの誤差を最小限に抑えるための修正アクションと計算

テキサスインスツルメンツでは、堅牢な閉ループ制御を実現するフラックスコントローラを設計しました。これは、計算量が非常に多く、複雑です。C29 CPU は、業界をリードするリアルタイム性能を達成し、トラクションインバータ市場に属する競合マイコンと比較して、2.5 倍以上の性能向上を実現しています (主要な車載 TIER1 がベンチマークとなっています)。ハードウェアベースの TMU (三角関数演算ユニット) 機能は、特定の数学関数を C29 CPU から大幅にオフロードするため、性能がさらに向上します。次の図は、安定した閉ループ制御を検証した TI の OPP 設計を示しています。

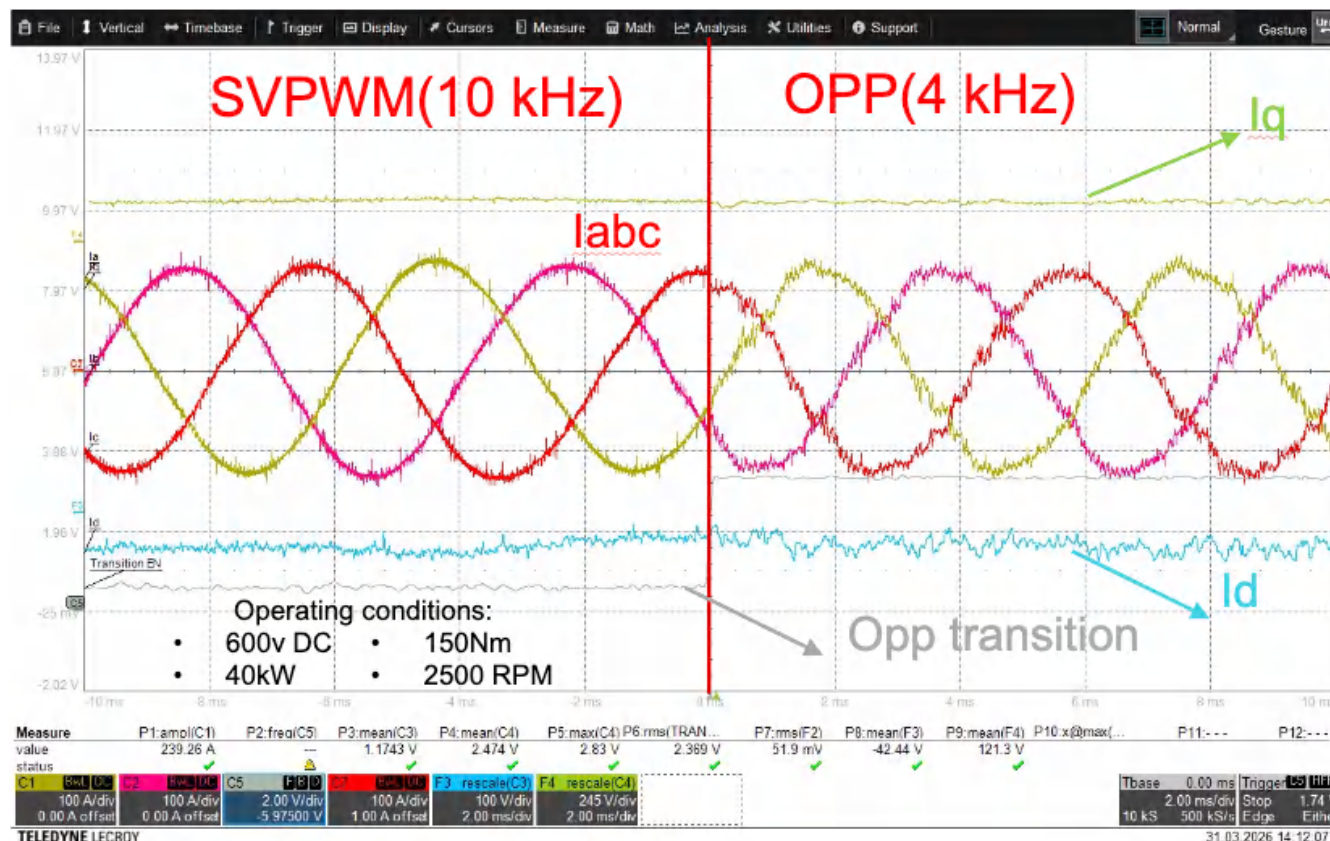


図 7-1. 安定した閉ループ制御

8 まとめ

EV と HEV の採用が増加し続ける中、EV 効率の最適化を通じた自動車コストの削減は、自動車メーカーにとって重要な優先事項となっています。トラクション インバータは、最適化のために最も影響を与える領域です。

TI の最適なパルス ポジショニング (OPP) 設計では、インバータ スイッチング 損失とモーターの高調波損失を動的に最小化する、新しい変調技術を導入しています。初期のテスト結果は有望であり、1 つのバッテリー パックを使用する場合に \$100 を超えるコストを削減できますが、TI の OPP ソリューションはより多くの特長と機能によって使いやすさと効率を改善し続けています。高性能 F29x マイコンとその差別化された機能により、OPP はバッテリー サイズの低減や航続距離の延長など、システム レベルの重要な利点を提供できます。EV 効率の最大化を求めている車載 OEM と 1 社員のサプライヤーにとって、TI の OPP ソリューションは、トラクション インバータのイノベーションにおける魅力的な次のステップとなります。

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黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、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](https://www.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