

Application Note

F29x を使用した DC/DC コンバータの機能安全目標の達成



Shawn Li, Sifan You, Hely Zhang

概要

電動機械式ブレーキ (EMB) システムは、ブレーキパイワイヤ技術の究極的な形態です。各ブレーキノードの電子部品は、ASIL-D 安全性インテグリティレベルを満たすことができます。電源部品として、従来型の設計では、外部電圧モニタを使用して、ASIL-D 定格のパワーマネージメント IC (PMIC) または降圧コンバータを直接使用することがあります。ただし、そのようなデバイスは市場で入手可能に限定されており、高コストで提供されます。

この記事では、システムレベルの機能安全設計を提案します。TI の F29x マイコンを監視ユニットとして使用し、コンパレータサブシステム (CMPSS) を活用して、ASIL-C 定格 LM686x5-Q1 の出力電圧のリアルタイム監視を実行します。低電圧または過電圧フォルトが検出されると、マイコンはシャットダウン信号を能動的に発行してフォルトを迅速に遮断し、電源システム全体の ASIL-D 準拠の達成に貢献します。

目次

1 概要.....	2
2 ハードウェア設計.....	3
3 ソフトウェア設計	6
4 テスト結果.....	7
5 まとめ.....	10
6 著者について.....	11
7 参考資料.....	12

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

EMB システムでは、電源の信頼性はシステムの安全性にとって非常に重要であり、自動車とドライバーの安全性に直接影響を及ぼします。ISO 26262 規格では自動車安全度水準を ASIL-A から ASIL-D までの 4 段階に分類しており、ASIL-D が最高レベルです。LM686x5-Q1 は ASIL-C 定格の降圧コンバータであり、過電圧保護 (OVP)、過電流保護 (OCP)、およびサーマル シャットダウン (TSD) などの複数のハードウェア保護機能を内蔵しています。ただし、出力低電圧保護 (UVP) は含まれていないため、同期整流降圧コンバータの突然の負荷サージ、電源不安定、ローサイドスイッチの短絡などの要因によって発生する出力電圧降下フォルトには対応できません。この不足部分は、外部の安全メカニズムによって補完する必要があります。

安全上の監視対象外領域に対応するため、F29x に内蔵された複数の CMPSS モジュールは、理想的な外部独立型安全監視設計を実現します。CMPSS は、2 つの独立したアナログ コンパレータであるハイサイド コンパレータ (CMPH) とローサイド コンパレータ (CMPL) で構成されており、それぞれに専用の 12 ビット内部 DAC が組み合わされることで、VOUT の分圧電圧信号を連続的かつリアルタイムに監視できるハードウェア ウィンドウ コンパレータを構成します。CMPSS が OV または UV イベントを検出すると、その出力は Output X-BAR を介して GPIO ピンへ直接ルーティングできます。CPU の介入なしに、GPIO からマイクロ秒以内に Low 信号を出力して、信号チェーン内の他のデバイスの EN ピンまたは nSTB ピンをプルダウンし、アクティブ シャットダウン保護を実行できます。LM686x5-Q1 と組み合わせて、ASIL-D 要件に準拠した電源システムを構成できます。

2 ハードウェア設計

従来型電源システムでは、通常は降圧コンバータの出力に追加の電圧モニタが配置されます。図 2-1 に示すように、TPS3762-Q1 は 65V 入力電圧モニタで、高精度、高速検出時間、および内蔵セルフテスト機能を備えています。このデバイスは 12V/24V システムに直接接続して過電圧および低電圧状態を継続的に監視でき、LM68645-Q1 の ASIL-D 準拠の達成に貢献します。ただし、この設計の場合はシステムコストと設計の複雑さが増大します。したがって、この記事では、システムコストを低減し設計を簡素化する最適化済みのソリューションを提案します。

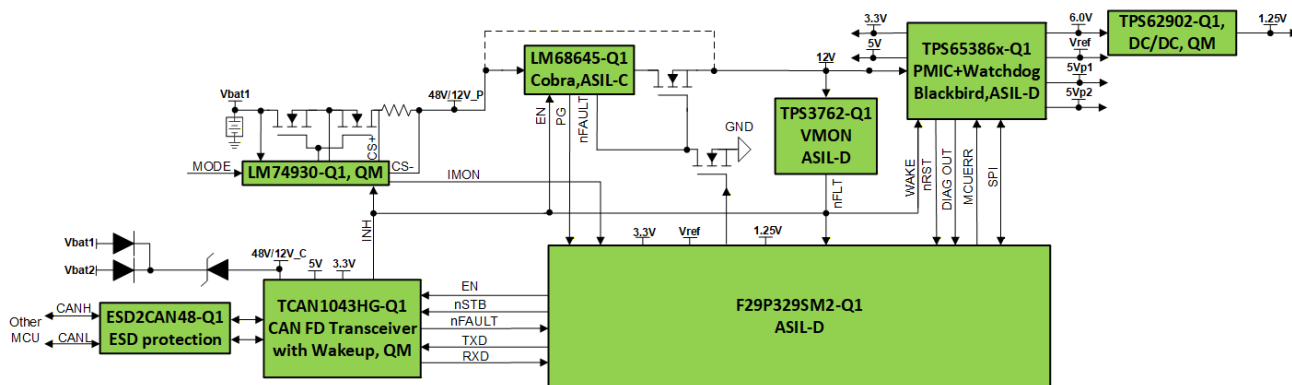


図 2-1. 従来の設計のブロック図

最適化された電源システムのブロック図を図 2-2 に示します。TCAN1043HG-Q1 は、INH 出力付きの CAN FD トランシーバで、ノードに存在するさまざまな電源を選択的に有効にするために使用できます。LM74930-Q1 は、1 対の外付けバックツープック NMOS を駆動および制御し、逆極性保護および逆電流ブロッキングを実現する理想ダイオードコントローラです。LM68645-Q1 は、本稿で主に取り上げる DC/DC コンバータです。このコンバータは制御可能な EN ピンを備えており、外部制御によるシャットダウンが可能です。F29P32-Q1 は、本稿で注目するマイコンです。ASIL-D、[YS1] までサポートするだけでなく、LM68645-Q1 の出力電圧を監視および保護できる CMPSS コンパレータも内蔵しています。

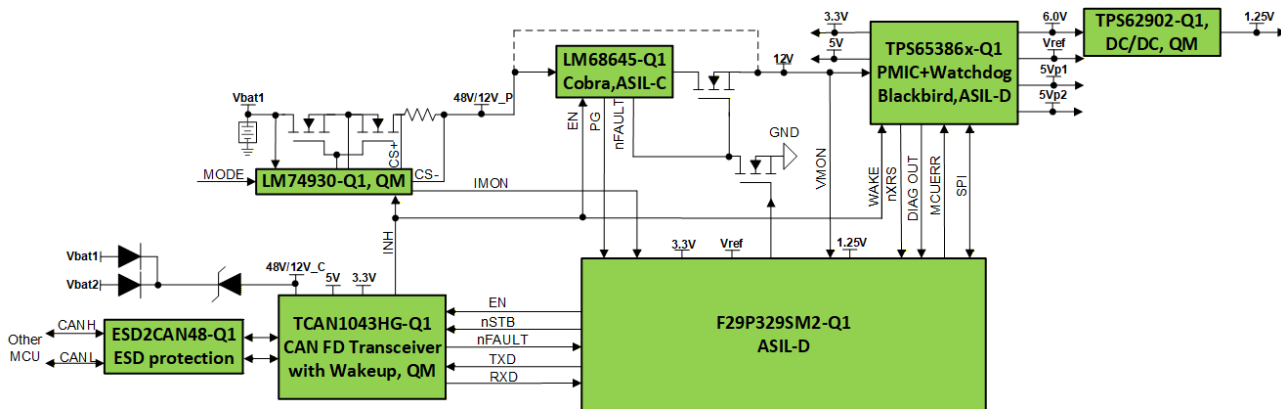


図 2-2. 最適化された設計のブロック図

TCAN1043HG-Q1 の回路図を図 2-3 に示します。TCAN1043xx-Q1 は、ISO 11898-2 (2016) 高速コントローラ エリア ネットワーク (CAN) 仕様の物理レイヤ要件を満たしており、CAN バスと CAN プロトコル コントローラとの間のインターフェイスとして機能します。これらのデバイスは、Classical CAN と CAN FD の両方のプロトコルをサポートしており、最大 2Mbps のデータレートに対応しています。EN_CAN は、マイコンがトランシーバの EN ピンを制御するために使用する信号です。初期の電源投入フェーズでは、マイコンの初期化が完了するまで、EN_CAN は low に保持されます。ただ

し、低電圧 (UV) タイム ウィンドウ内では、INH ピンはデフォルトで high を出力するため、DC/DC コンバータおよび PMIC が有効になり、すべての電源レールが正常に出力されて、マイコンが正常に動作できるようになります。その後、マイコンはこの低電圧 (UV) タイム ウィンドウを利用して EN_CAN を High に設定し、INH_CAN を high レベルに維持します。

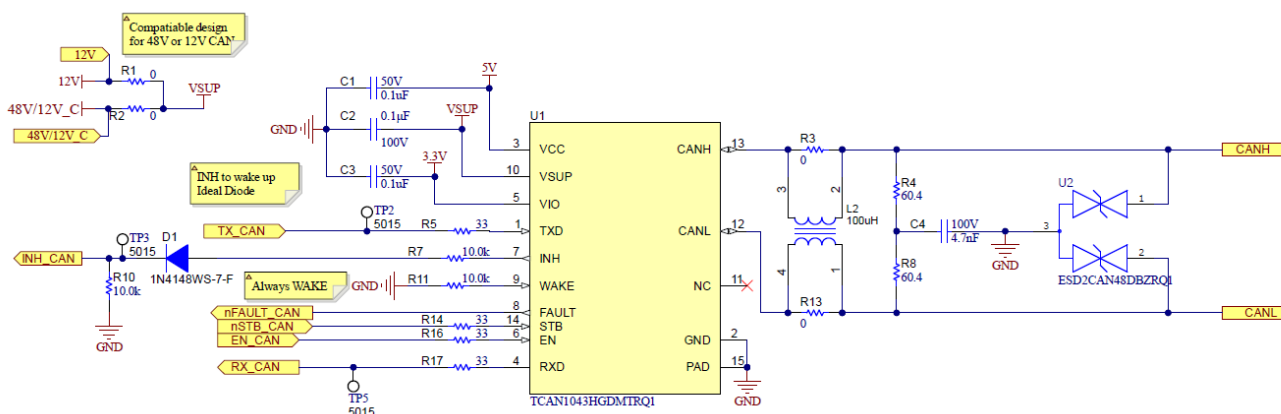


図 2-3. TCAN1043HG-Q1 の回路図

LM74930-Q1 の回路図を図 2-4 に示します。この回路で Q1 と Q2 を制御して、ダウンストリームの降圧コンバータへの入力電圧のスイッチング制御を実現しながら、過電流保護と過電圧保護も備えています。入力電源電圧範囲が 4V ~ 65V と広いので、12V および 24V の車載用バッテリーで動作する ECU を保護および制御できます。このデバイスは、最低 -65V の負の電源電圧に耐えられ、負荷を保護できます。EN ピンは INH_CAN で制御され、V(ENF) より低くプルすると駆動出力がシャットダウンされます。

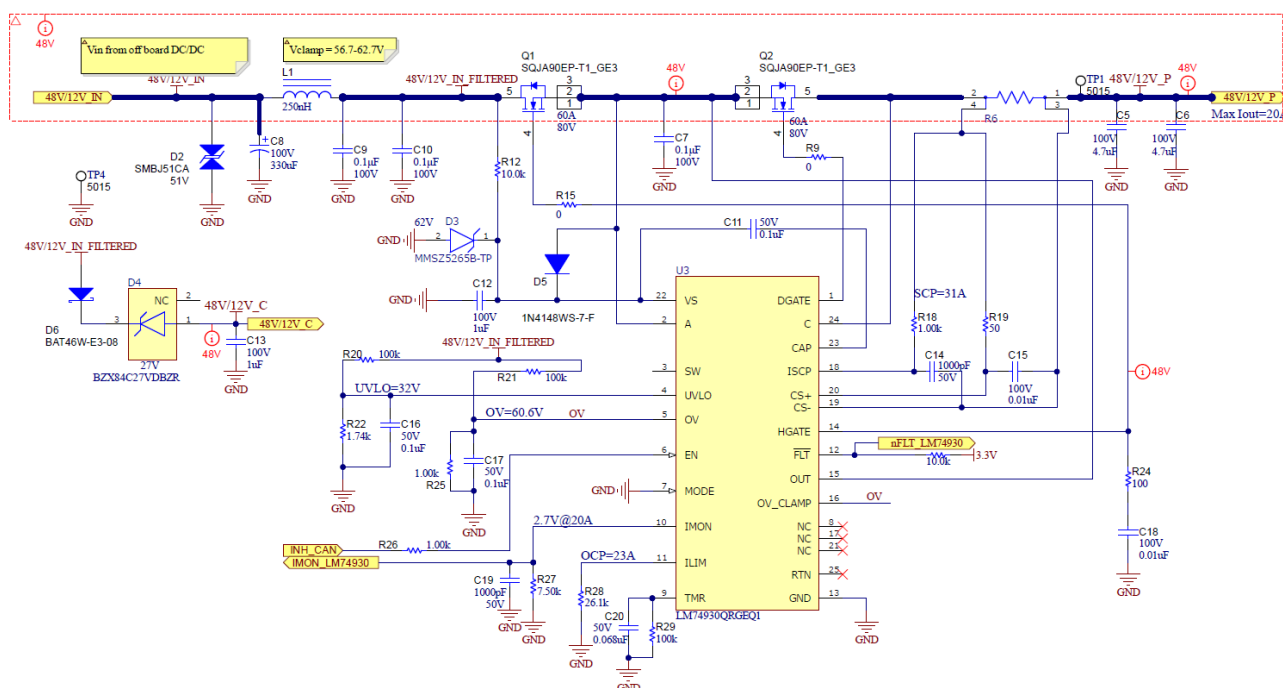


図 2-4. LM74930-Q1 の回路図

図 2-5 に、LM68645-Q1 の代表的な回路図を示します。このシステムでは、このコンバータを使用して 48V を 12V に降圧します。その EN ピンも INH_CAN によって制御されます。さらに、Q3 が追加されており、チップがフォルトを検出すると、nFAULT ピンが直ちに Low 信号を出力して Q3 をオフにし、下流側の部品を保護します。同時に、出力電圧は抵抗

R42 および R43 によって分圧されて VMON が生成されます。VMON は MCU の CMPSS モジュールに入力され、監視および診断に使用されます。CMPSS モジュールが過電圧または低電圧のフォルトを検出すると、直ちに nSTB を Low にプルし、TCAN1043HG-Q1 を Sleep モードに移行させます。これにより、INH_CAN が Low にプルされて LM68645-Q1 が無効化され、より深刻なシステム フォルトの発生を防止します。

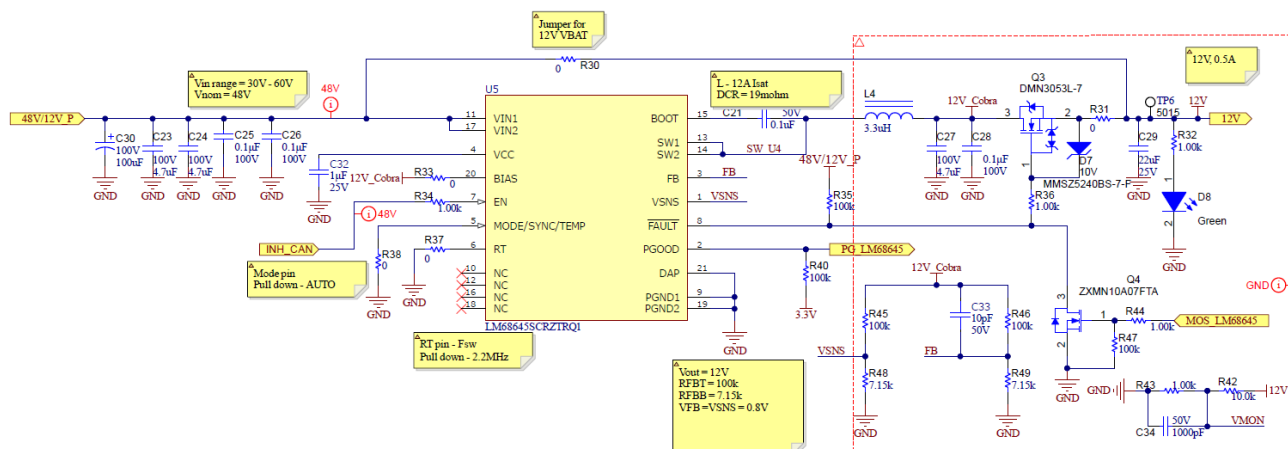


図 2-5. LM68645-Q1 の回路図

図 2-6 に、F29P329SM2-Q1 の AIO (アナログ入出力) ピン割り当て図を示します。12V レールの過電圧と低電圧の両方を同時に監視するには、VMON を CMPSS モジュールのハイサイド正入力 (HP) とローサイド正入力 (LP) の両方に同時に割り当てる必要があることに注意してください。この設計では、VMON の入力としてピン 34 を選択し、CMP4_HP3 および CMP4_LP3 に割り当てています。

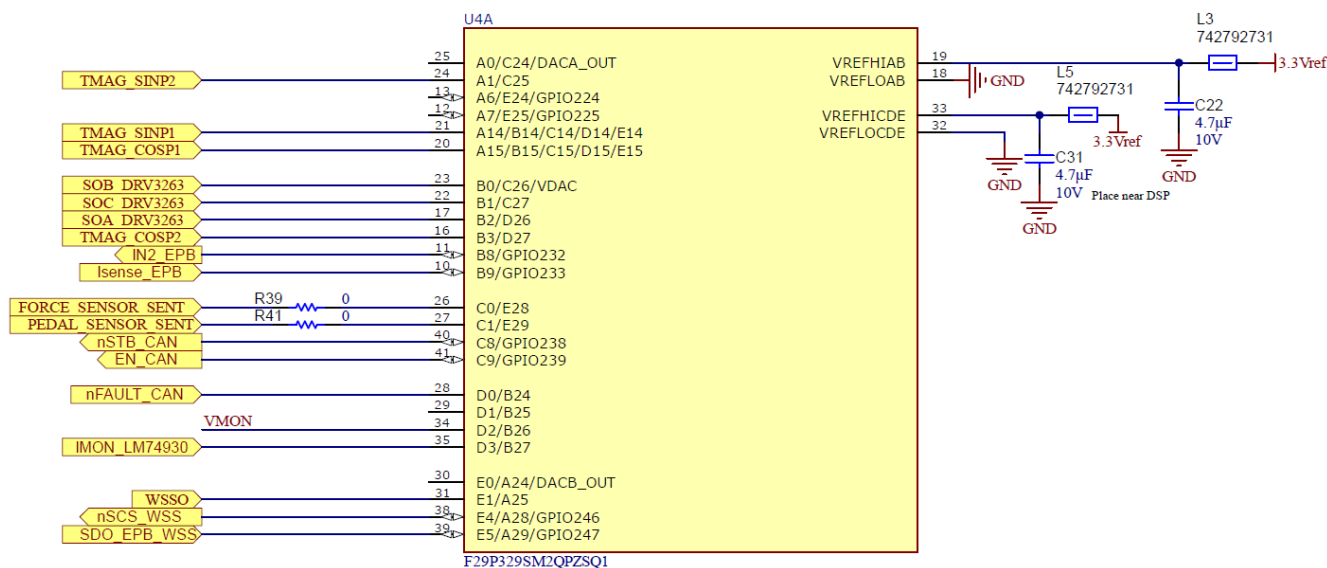


図 2-6. F29P329SM2-Q1 AIO ピンの配置図

3 ソフトウェア設計

F29x 内の CMPSS モジュールの機能ブロック図を、[図 3-1](#) に示します。各モジュールには、独立してプログラム可能な 2 つの 12 ビット基準 DAC が搭載されており、それぞれ HN および LN にデジタル出力を生成して、過電圧しきい値および低電圧しきい値として機能します。各コンパレータ出力は、プログラム可能なデジタル フィルタを通過して、不要なトリップ信号を除去できます。CTRIPOUTx (x = H または L) 信号は、[図 3-2](#) に示すように、外部信号用の Output X-BAR に接続されています。この設計では、CTRIPOUTH と CTRIPOUTL の両方をピン 40 にルーティングし、OUTPUTXBAR6 に割り当てています。ピン 40 は最終的に nSTB_CAN 信号を出力します。

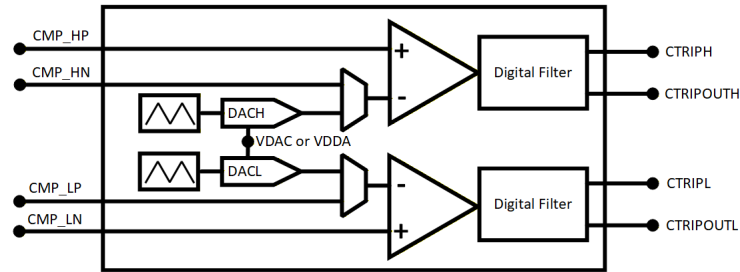


図 3-1. CMPSS モジュールの機能ブロック図



図 3-2. CMPSS モジュールの接続

この設計では、降圧コンバータの定格出力電圧は 12V です。過電圧および低電圧のしきい値は、定格電圧に対して $\pm 10\%$ の偏差となるように設定され、それぞれ 13.2V および 10.8V に対応します。図 5 に示す分圧器のサンプリングネットワークに基づき、対応する 12 ビット DAC の値を 1489 と 1218 と計算します。CMPSS モジュールが低電圧および過電圧イベントを正しく検出し、nSTB_CAN を Low にプルすることを確認するために、次のコードを使用できます。これにより、TCAN1043HG-Q1 が INH を Low にプルし、下流側のデバイスを無効化します。

```
(1)
vTimer0[0]++;
if (vTimer0[0]==10000)
    CMPSS_setDACValueHigh(CMPSS4_12V_BASE,1489U);

    CMPSS_setDACValueLow(CMPSS4_12V_BASE,1400U);
vTimer0[0]=0;
(2)
vTimer0[0]++;
if (vTimer0[0]==10000)
    CMPSS_setDACValueHigh(CMPSS4_12V_BASE,1300U);
    CMPSS_setDACValueLow(CMPSS4_12V_BASE,1218U);
vTimer0[0]=0;
}
```

この設計では、降圧コンバータの出力電圧は 12V に一定に維持されます。コード セグメント (1) の機能は、タイマ カウントが 10000 に達した後に、LN の値を初期設定の 1218 から 1400 に変更することです。これにより、対応する電圧しきい値が 10.8V から 12.4V に変化し、出力低電圧状態をシミュレートします。コード セグメント (2) の機能は、タイマ カウントが 10000 に達した後に、HN の値を初期設定の 1489 から 1300 に変更することです。これにより、対応する電圧しきい値が 13.2V から 11.5V に変化し、出力過電圧状態をシミュレートします。

4 テスト結果

この記事では、LM68645-Q1 の 2 つの機能安全要件 (FSR) を設計します。

- FSR1: LM68645-Q1 は、出力電圧が最大相対誤差 10% の範囲外にならないようにします。
- FSR2: LM68645-Q1 は、出力電圧が最大相対誤差 -10% の範囲外にならないようにします。

両方の FSR の安全状態は、FTTI が 5ms の場合に 12V 出力をシャットダウンすることです。

この記事では、12V の低電圧および過電圧イベントに対する実験的検証を示します。テスト条件は、定格入力電圧 48V、定格出力電圧 12V、定格出力電流 0.5A です。図 4-1、図 4-2 および 図 4-3 に、12V の低電圧イベント後の測定波形 (nSTB_CAN、INH、12V が順次シャットダウンされる) を示します。F29x CMPSS モジュールの最大出力遅延は 60ns、nSTB_CAN および INH の合計 Low 時間は 52.9 μ s です。12V 電圧レールには 188 μ F の電解コンデンサがあるため、12V のシャットダウン時間はゆっくりと 1.77ms になるため、低電圧イベントが発生してから 12V シャットダウン全体までの合計時間は 1.82ms です。

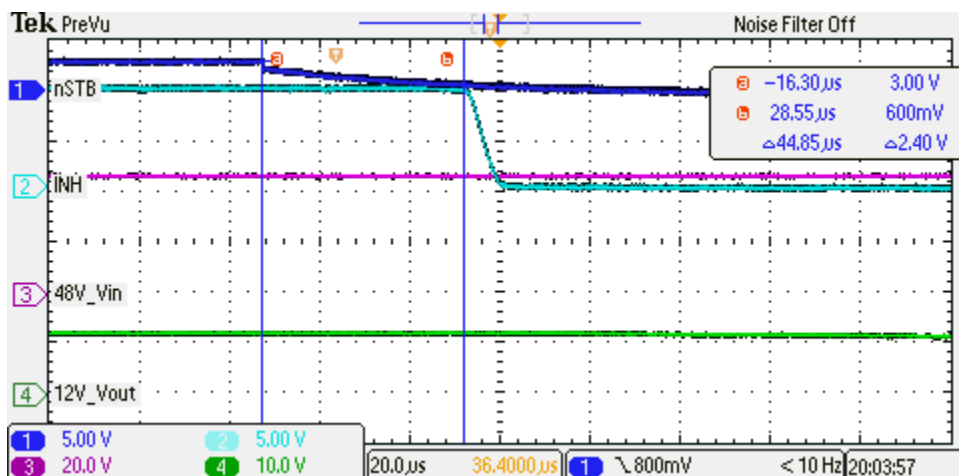


図 4-1. nSTB が UV 保護のために INH をトリガするまでの時間

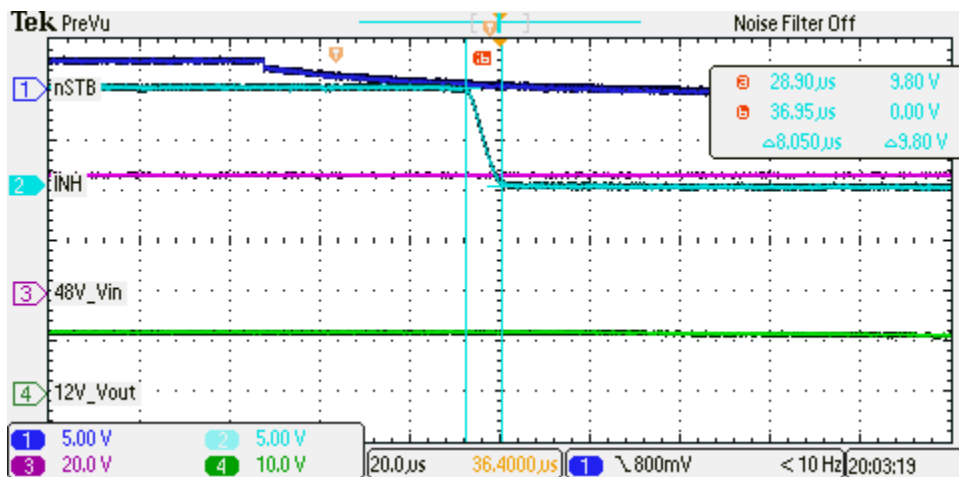


図 4-2. UV 保護による INH の立ち下がり時間

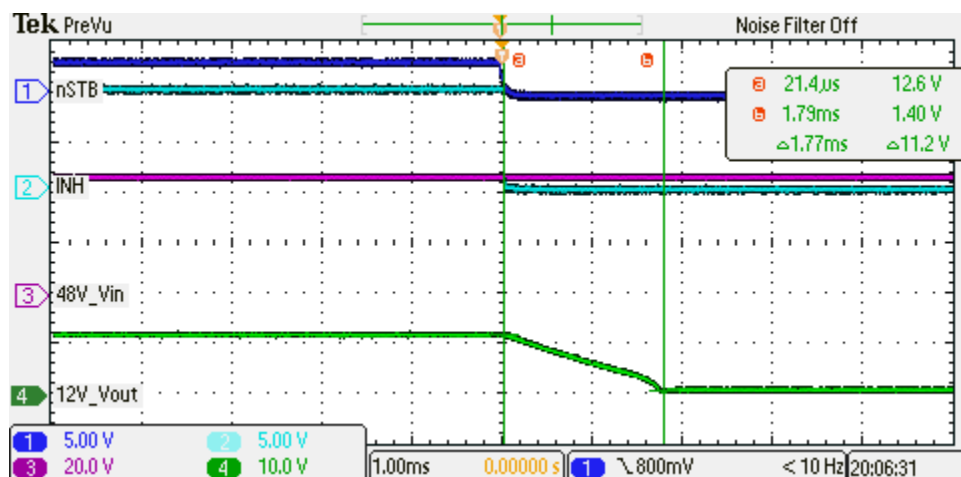


図 4-3. UV 保護のための 12V の立ち下がり時間

図 4-4、図 4-5 および 図 4-6 に、12V の過電圧イベント後の波形を示します。信号シーケンスは低電圧イベントの場合と同一であり、プロセス全体の所要時間は 1.98ms です。結果から、この設計の安全メカニズムが検証され、システムが目標 FTTI 内で期待される安全状態に到達することを示しています。

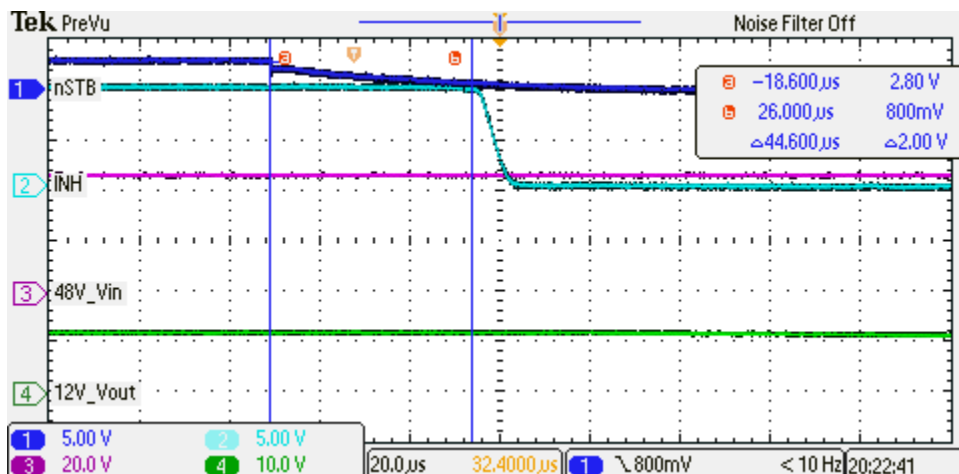


図 4-4. nSTB が OV 保護のために INH をトリガするまでの時間

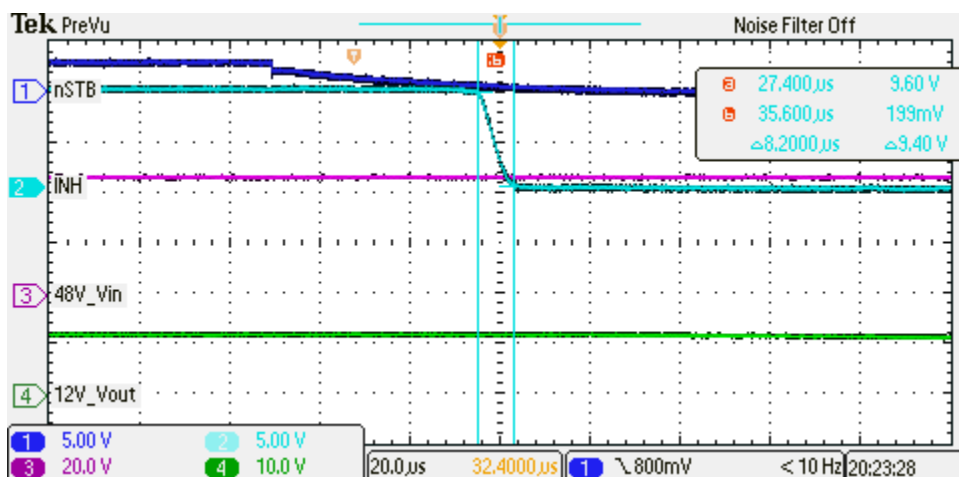


図 4-5. OV 保護による INH の立ち下がり時間

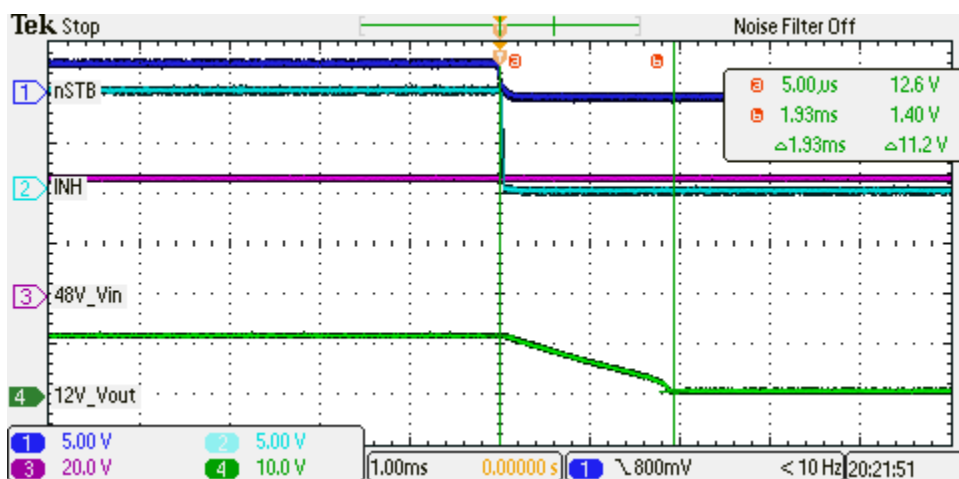


図 4-6. OV 保護のための 12V の立ち下がり時間

5 まとめ

電気機械式ブレーキ (EMB) システムは、電動モータを使用してブレーキ アクチュエータを直接駆動し、従来の油圧ブレーキに代わる新しいブレーキ技術です。これは、高速応答、高いブレーキ精度、自動運転制御システムとの統合の容易さなどの利点を備えており、次世代のインテリジェント車両シャーシ技術の重要な開発方向となっています。EMB は車両の走行安全性に直接関わるため、システム ハードウェア アーキテクチャ、フォルト検出、および応答能力に対して極めて厳しい要件が課されます。そこで本稿では、EMB アプリケーション向けのシステムレベルの機能安全設計を提案します。この記事では、EMB アプリケーション向けのシステムレベルの機能安全設計を提案します。F29x の CMPSS モジュールを活用することで、DC/DC コンバータ向けのフォルト診断および安全応答メカニズムを設計し、ASIL-D におけるすべての安全指標要件を満たすとともに、システム コストの削減と設計の複雑さの低減を実現します。

6 著者について

SHAWN LI は、テキサス インスツルメンツ中国の **Auto Tier1** チームのフィールド アプリケーション エンジニアで、車載分野におけるシャーシ、ボディ、およびライティング アプリケーションを専門としています。2022 年および 2025 年に華南理工大学でパワー エレクトロニクスおよび電力伝送の学士号と修士号を取得し、2025 年に TI に入社しました。

SIFAN YOU は、テキサス インスツルメンツの車載システム機能安全およびサイバーセキュリティチームのシステムエンジニアであり、HEV/EV 機能安全アプリケーションを専門としています。2019 年と 2022 年に北京交通大学で交通情報工学および制御の学士号と修士号を取得し、2025 年に TI に入社しました。

HELY ZHANG はテキサス インスツルメンツのシステム エンジニアで、特にパワー エレクトロニクスおよびモーター インバータに関連する、家電製品および車載シャーシ向けリファレンス デザインの開発を担当しています。Hely は 2002 年に安徽理工大学でパワー エレクトロニクスおよび電力伝送の修士号を取得し、TI に入社する前は **General Electric** および **SolarEdge** に勤務していました。

7 参考資料

- ISO、[ISO-ISO 26262 道路車両の機能安全](#)、Web ページ。
- テキサス インスツルメンツ、[F29H85x](#)、[F29P58x](#)、[F29P32x](#) リアルタイム マイコン データシート、データシート。
- テキサス インスツルメンツ、[F29H85x](#) および [F29P58x](#) リアルタイム マイコン テクニカル リファレンス マニュアル、テクニカル リファレンス マニュアル。
- テキサス インスツルメンツ、[LM686x5-Q1 65V、2.5A/3.5A/4.5A](#)、機能安全アプリケーションに最適化された低 EMI スイッチャ技術搭載、車載用同期整流降圧 DC/DC コンバータ、データシート。
- テキサス インスツルメンツ、[TCAN1043xx-Q1](#) 低消費電力、フォルト保護、CAN FD およびウェイク機能付き CAN トランシーバ、データシート。
- テキサス インスツルメンツ、[LM74930-Q1](#) 車載用理想ダイオード サージ ストップ、サーキット ブレーカ、過電圧保護 およびフォルト出力付き、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