

Application Brief

ヒューマノイドロボット向け電力段の実装



現在、工場やサービス分野にいる他のロボットと同様ですが、ヒューマノイドロボットは、周囲の環境に対する自由度 (DOF) と高速な応答時間 (ミリ秒単位) で、人間の動きを模倣するように設計されています。図 1 に示すように、ロボットシステムのエンジニアは、これらのロボット全体で多くのモーターが直面する電源関連の設計上の主な課題を解決することができ、その結果、ロボットシステムのエンジニアに課題が生じます。

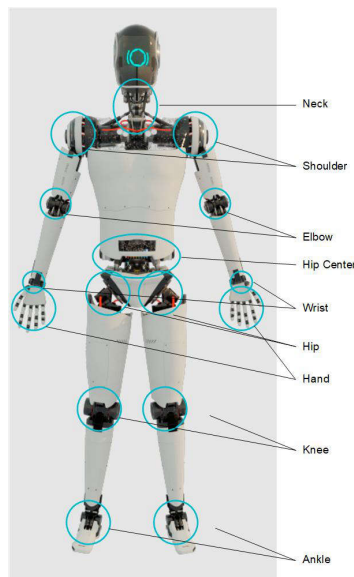


図 1. ヒューマノイドロボットにおける DOF の位置表示

図 1 に示される DOF は、モーターが動かす負荷の大きさに応じて必要な電力が異なり、その出力レベルは通常 10W ~ 4kW の範囲で変動し、ほとんどのドライブは 10W ~ 1.5kW の範囲に収まります。

一般的な電力要件は、次のオプションに分類できます：

- 10W ~ 100W: 手首と手
- 100W ~ 300W: 足首、肩、首
- 1kW ~ 1.9kW: 腕 1.5kW
- 2.5kW ~ 4kW: 膝、股関節、股関節中心

これらのカテゴリは、モーターのサイズおよび熱性能に関してそれぞれ異なる要件があり、部品を選定する際に考慮する必要があります。モーターの種類も、出力レベルおよび効率要件に基づいて選定する際の検討事項の一つです。

たとえば、永久磁石同期モーター (PMSM) を使用して設計する場合、矩形波または正弦波の制御トポロジから選択できます。一般的に、巻線や制御アルゴリズムがモーターの制御精度に影響を与えるため、正弦波制御が選択されます。

ヒューマノイドのバッテリーは通常、SELV 電圧範囲 (60V 未満) で動作するように設計されています。これは、部品が最大 60V まで動作可能である必要があることを意味し、さらに FET やゲートドライバにおけるシステム内のノイズの影響を低減するため、最大 100V まで動作可能であることが望まれます。

スイッチング周波数を高くしてドライブのトルクリップルを低減することで、モーションコントローラによるより精密なトルク制御が可能となり、ドライブの性能向上につながります。これを実現するために、高性能な MosFET または GaN FET で高

スイッチング周波数を用いてドライブを構成する必要があり、その結果、モーター効率の向上に寄与します。GaN FET は、FET の容量が小さくボディダイオードを持たないため、スイッチング エネルギーが低くなります。これにより、高いスイッチング周波数においてスイッチング損失が低いという利点があります。高度なアルゴリズムを用いることで、モーターの FET におけるスイッチング要件および損失を低減することもできます。

ロボットでは温度に関する制約があるため、モータードライブの高電力密度は重要な検討事項です。ロボットの外装温度は 55°C を超えてはならず、この温度では約 10 秒で全層皮膚熱傷を引き起こす可能性があります。このような接触は、人間の近くで作業するロボットでは非常に短時間で発生する可能性があります。ヒューマノイド ロボットのサイズおよび重量の制約により、温度管理設計ではファンや液体冷却を採用することができません。熱管理においてアクティブ冷却が使用できないため、ロボットは温度を低く保つために電力損失を低減する必要があります。

ヒューマノイド ロボットを設計する際には、機能安全も重要な検討事項の一つです。現時点で、ヒューマノイド ロボットの機能安全の要件を定義する標準は存在していません。ただし、コボットと産業用ロボットに関する標準は存在しています。しかし、将来に向けた安全要件を策定するために、世界各地でヒューマノイド ロボットを分析している研究グループが存在します。安全要件が定義されるまで、ヒューマノイドの設計者は現在のシステム設計に対して適切な注意を払い、将来的な再設計に投入する労力を最小限に抑える必要があります。現時点では、ISO13482、ISO10218、ISO3691-4 などの規格を参照することで、今後の動向をある程度見通すことができます。このトピックは、すべてのモーター ドライブ クラスで同じ一般的なトピックであり、別の章で説明します。

10W ~ 100W: 手首と手

ヒューマノイド ロボットの手首および手のシステムでは、手首と手の主要な動きを再現するために、通常、片手あたり 8 個以上のモーターが必要となります。このような小さなスペースに多数のモーターがあるので、サイズは非常に重要です。基板上の IC の集積度を高めることで、設計全体の小型化に寄与します。

設計にあたっては、集積化のメリットを活かしつつ、サイズの最適化を図れるようにシステムをどのようにブロック分割するかを検討する必要があります。モータードライブでは、FET、ゲートドライバ、および 3 相すべての電流検出を一つのデバイスに統合する方法が一般的です。このデバイスはモーター コントローラに接続され、統合されたモーターからの信号を受信し、ロボット コントローラと通信します。

TI は、モーター ドライブおよび統合型 GaN ハーフブリッジの幅広い製品ラインアップを提供しています。これらのデバイスの多くは高い集積度を備えており、設計者がこのような高密度でコンパクトなシステムを構築するうえで適合し、必要とされます。

シリコン FET: ゲートドライバ内蔵

BLDC モーター ドライバを選定する際には、デバイスの高い集積度と、それによるスペース削減の可能性が重要な設計要素となります。手首から手にかけての DC バス電圧は、ヒューマノイド ロボットの他の部位とは異なります。電源レール電圧は、実装に応じて 24V ~ 48V の範囲となる場合があります。BLDC ドライバを選定する際は、絶対最大定格電圧が動作電圧の 1.5 ~ 2 倍であるものを選択することが推奨されます。24V を必要とする設計に対応するため、DRV8316C を使用することを推奨します。DRV8316C は、定格 40V、ピーク 8A の 3 相モータードライバで、FET および 3 つの CSA (電流センス アンプ) を内蔵しています。ハイサイドとローサイドの RDS(ON) の合計は 95mΩ であり、高電流に対する耐性が高く、システム内の熱管理にも適しています。このデバイスは、降圧コンバータ、LDO、SPI およびハードウェア インターフェイスを内蔵し、7 × 5mm の QFN パッケージで提供されます。36 ~ 48V で動作するために、DRV8376 は FET 内蔵 BLDC ファミリーに新しく追加された製品です。このデバイスは、定格 70V、ピーク 4A の 3 相モータードライバで、FET および 3 つの CSA を内蔵しています。ハイサイドとローサイドの RDS(ON) の合計は 400mΩ です。DRV8376 は、出力電圧スルーレートを 1.1V/ns で調整可能であるため、スイッチング損失が低減されます。低い可聴ノイズと簡易なモーター制御を実現するために、DRV8376 は 200ns 未満の超低デッドタイムと 100ns 未満の伝搬遅延を備えています。このデバイスは、小型の 6 × 5mm QFN パッケージで、SPI およびハードウェア インターフェイスに対応しています。FET を内蔵したモータードライバでは、システム要件に基づいてデバイスの電力対応能力を評価するためのサーマル計算ツールが利用可能です。DRV8316C の標準動作は 80W で、DRV8376 は 50W です。これらの値は、システム実装によって異なる場合があります。

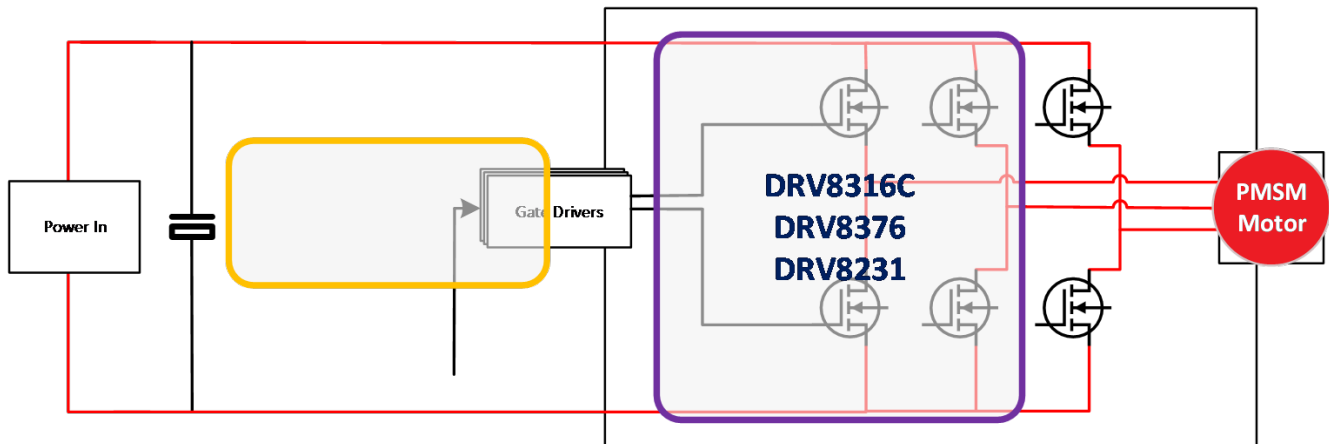


図 2. ゲートドライバ ブロック図

100W ~ 300W: 足首、肩、首

これらのシステムは設置位置の関係でより多くのスペースを確保できるため、このカテゴリのドライブ設計にはより多くのオプションがあります。

これらのドライブを設計する際、顧客は電力要件とサイズ制約の両方を満たすモータードライバを選定する必要があります。ここではサイズ制約がそれほど厳しくないため、FET 内蔵のゲートドライバを用いる構成と外付け FET を用いるオプションの両方を採用可能です。しかし、ロボット全体の温度が十分に低く保たれることを確認するため、熱設計を考慮する必要があります。

シリコン FET: ゲートドライバ

足首、肩、首ではより高い出力が必要となるため、設計時には通常ゲートドライバが用いられます。これにより、同一のゲートドライバ設計を維持したまま、より高い出力要件に応じて FET を交換できる柔軟性がエンジニアに提供されます。このレベルの出力には、これらの関節に対して 48V の電源レールが使用されます。DRV8300、DRV835xF、および DRV8162 は、この電圧および出力レベルに推奨されるデバイスです。DRV8300 は、集積度を最小限に抑えたシンプルな 100V 対応の 3 相ゲートドライバです。このデバイスの主な使用事例は、コスト重視でスペースの制約が厳しいシステムです。TSSOP から QFN までさまざまなパッケージ バリエーションがあり、ブートストラップ ダイオードを内蔵したものや、外付けで実装可能な構成も用意されています。DRV8353F は、機能安全品質管理認証を取得し、3 個の CSA (電流センス アンプ) を内蔵した高集積 100V 対応デバイスです。多くのロボット環境では、人間と相互作用する際の安全性

の確保が極めて重要です。DRV8353Fには、IEC 61800-5-2 に準拠した機能安全システム設計を支援するためのドキュメントが用意されています。DRV8162 は、DRV8353F と同じ安全性に関する考慮事項を実装した、スマートシングルハーフブリッジゲートドライバです。ロボティクス用途における DRV8162 の詳細については、協働ロボットからヒューマノイドまで:大電力ロボットでのシステム効率と安全性の推進を参照します

GaN FET:電力段

ヒューマノイドロボットでは、熱要件およびスペース制約を満たすために、GaN デバイスの採用が増加しています。LMG2100R044 は、100V、4.4mΩ のハーフブリッジおよびドライバで、ブートストラップダイオードを内蔵しています。このデバイスは、4.5 × 5.5mm の QFN パッケージで提供され、ヒートシンクなしで最大 16A の 3 相インバータを駆動できます。詳細については、『GaN 3 相インバータ』デザインガイドを参照してください。

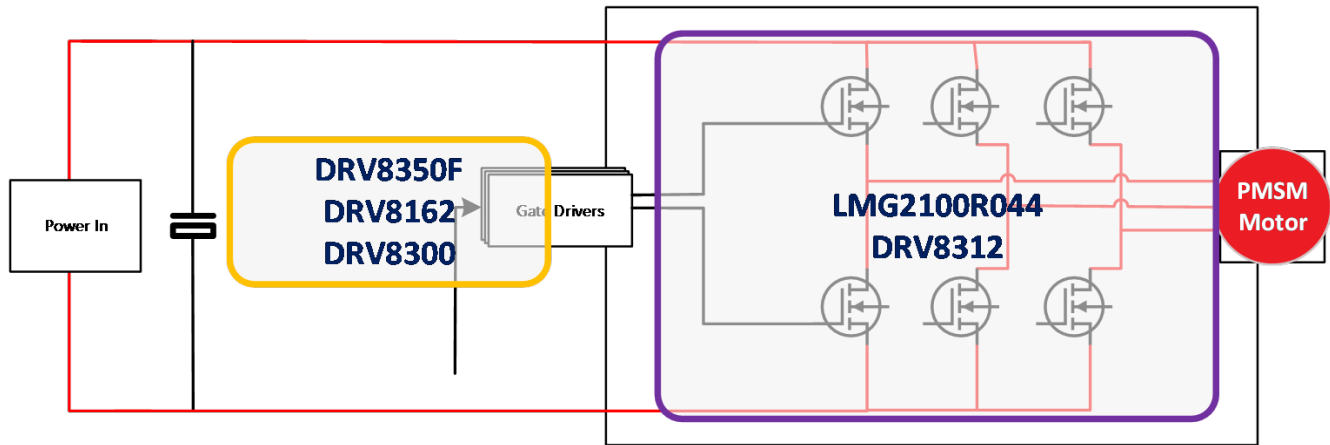


図 3. ゲートドライバブロック図

1kW ~ 1.9kW: 肘

ヒューマノイドロボットの肘用モータードライブの設計では、機能安全と高出力の両方が重要な検討事項となります。ここでは関節の機械的重量が大きいため、ドライブの熱性能および効率が重要となり、設計者は高電力密度の設計を行う必要があります。

モータードライブの駆動周波数を高めてドライブのトルクリプルおよび電流リップルを低減することは、効率向上を実現するための一つの手法です。

GaN FET などのオプションは、FET は損失が低く、より小型の設計が可能であるため、検討することができます。

図 4 に電力段のブロック図を示します。

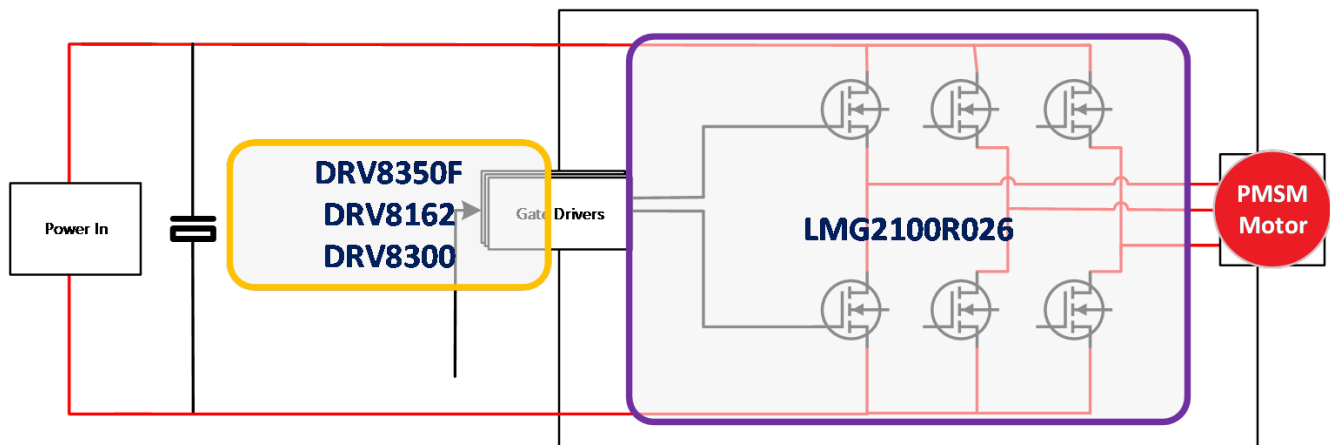


図 4. 電源のブロック図

BLDC: ゲートドライバ

詳細については、[100W ~ 300W: 足首、肩、首](#) を参照してください。

GaN FET: 電力段

肘関節向けには、[LMG2100R026](#) は損失を最小限に抑えつつ高電力密度を実現し、熱要件を満たします。[LMG2100R026](#) は、ゲートドライバ、ブートストラップ ダイオード、および $2.6\text{m}\Omega$ の GaN ハーフブリッジを内蔵した $4.5 \times 7\text{mm}$ の QFN パッケージで提供されます。このデバイスは [BOOSTXL-LMG2100-MD](#) を使用して評価できます。

2.5kW ~ 4kW: 膝、股関節、股関節中心

このカテゴリのモーターはロボット内で最も高い出力を必要とし、その設計における電力密度が機能の実現において極めて重要です。これらのモーターでは、高効率と小型化が重要な設計課題となります。通常、システム設計を構築するために複数の FET を並列接続する必要があります。これは、システム全体の効率を向上させるために高速スイッチングを実現できるように、ゲートドライバにより高い電流駆動能力が求められることを意味します。

高速スイッチングにより、より高い PWM 周波数の適用が可能となり、システムのトルクリプルおよび電流リップルの低減につながります。

BLDC: ゲートドライバ

膝および股関節における $2.5 \sim 4\text{kW}$ の用途では、[DRV8162](#) が主要な採用デバイスとなります。

詳細については、[ロボットからヒューマノイドまで: 大電力ロボットでのシステム効率と安全性の推進](#) を参照してください。

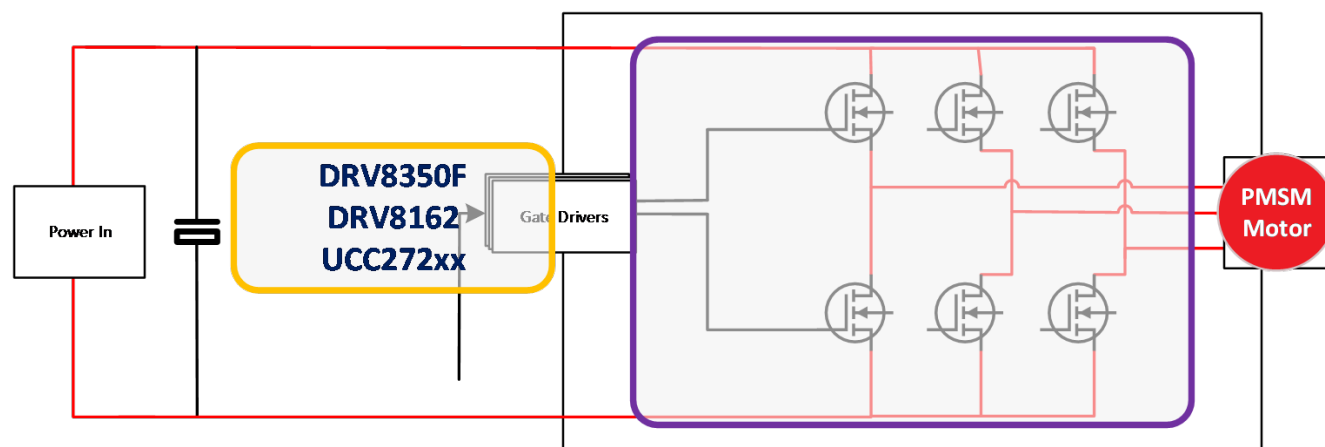


図 5. BLDC ゲートドライバの図

ヒューマノイド ロボットのモータードライブ システムを最適化するためには、設計者がさまざまな状況を分析し、要件を定義する必要があります。TI は、設計者がヒューマノイド ロボットを構築できるように、4 つの設計カテゴリすべてに対応可能なソリューションを提供しています。

機能安全

将来の設計を見据える際には、機能安全認証の簡素化に役立つデバイスを選定することが重要です。ISO13482、ISO10218、ISO3691-4 などの規格は、ヒューマノイドの安全要件の今後の動向を見通すうえで参考になります。クラス C 規格である ISO10218 および ISO3691-4 は、いずれも ISO13849 を参照し、システムに PLd が求められると規定しています。ただし、ISO3691-4 はアーキテクチャの選択を実装者に委ねている一方で、ISO10218 は CAT3 アーキテクチャを必須としています。これらの標準の最悪の状況を考慮すると、ヒューマノイド ロボットには少なくとも CAT3 PLd の安全性に関する考慮事項を検討する必要があります。図に示す安全アーキテクチャは、CAT3 システムを実装する必要があります。

モータードライブに安全機能を実装する場合、一般的には IEC61800-5-2 または IEC60204-1 に基づき、STO やカテゴリ 0、1、2 の機能を用いて安全停止機能を実現します。この停止機能は、ゲートドライブおよびそれを無効化する方法に大きく依存します。TI は、TÜV SÜD と連携し、この種の安全機能に TI のゲートドライブをどのように使用するかを示すコンセプトの文書化を進めています。詳細については、『[統合型 3 相スマート ゲートドライブを使用したより小型のセーフトルク オフ \(STO\) システムの設計](#)』を参照してください。

TI は、顧客が安全設計を構築できるよう、豊富な安全関連ドキュメントを備えた多くのデバイスを提供しています。を参照してください。

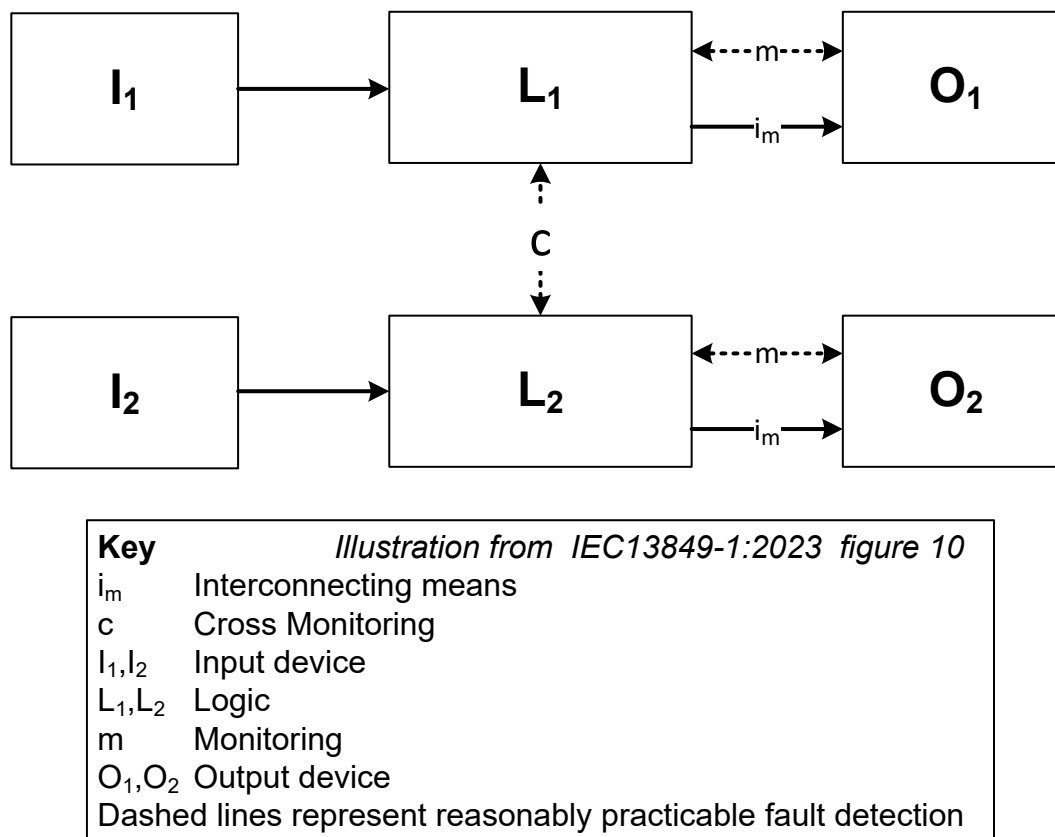


図 6. IEC13849-1:2015 より引用した図

まとめ

ヒューマノイドロボットのモータードライバを設計する際には、ロボット内での機能に応じて異なる設計仕様を持つ多様なドライブ方式が存在します。TI は、これらのさまざまな設計仕様の実現を可能にする幅広い集積回路のポートフォリオを提供しており、環境に迅速に反応できるロボットの構築を支援します。図 7 に、複数の TI 製品を採用した 1kW ~ 1.9kW モータードライブ システムのブロック図を示します。

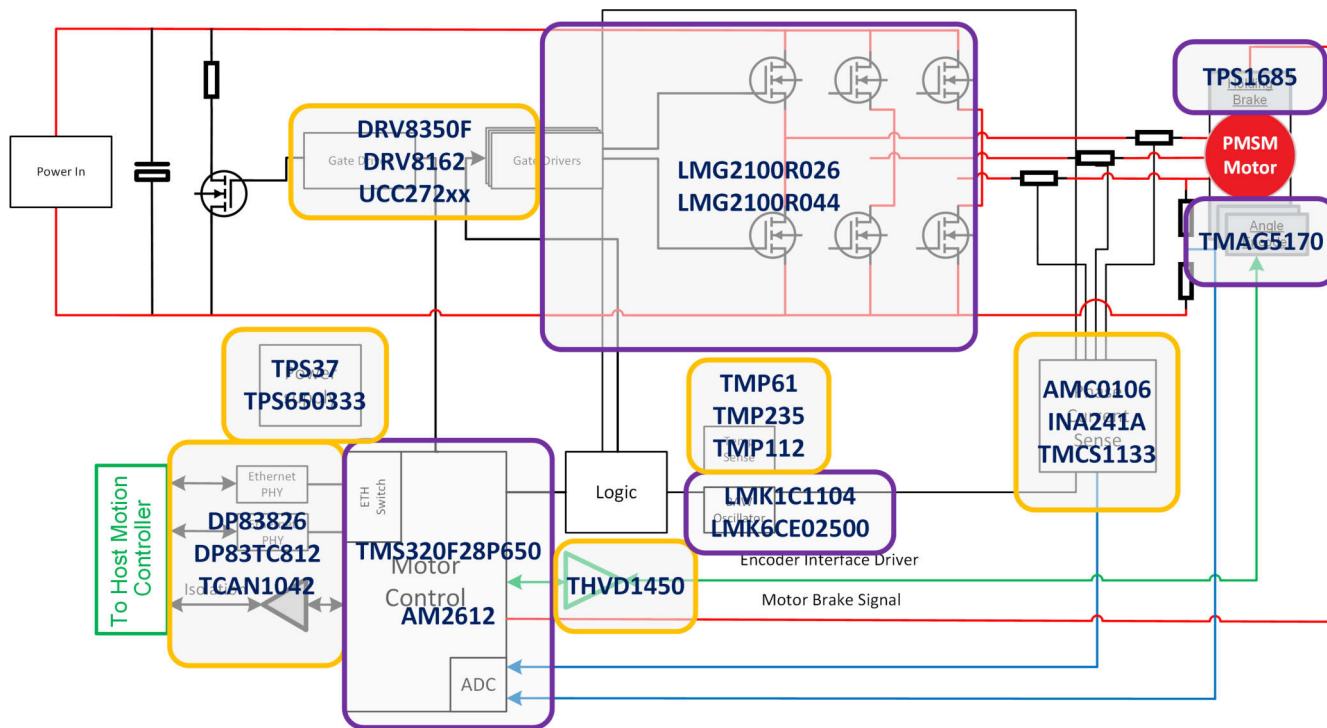


図 7. 1kW ~ 1.9kW のシステム ブロック図

TI は、評価基板やリファレンス デザインを多数提供しており、エンジニアがシステム設計をより迅速に評価し、量産対応設計の構築プロセスを効率化できるよう支援します。また、TI は機能安全製品と設計ツールにより、機能安全システムの設計プロセスの簡素化と迅速化を可能にします。

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツ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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

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](#)、[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