

Application Note

HVDC アーキテクチャと制御および保護向けの設計の概要



概要

このアプリケーションレポートは、高電圧直流 (HVDC) 電力伝送アーキテクチャと、制御および保護のためのソリューションを紹介します。

目次

1 HVDC 電力伝送の概要とアーキテクチャ.....	2
2 HVDC 送電システム (HVDC ステーション).....	5
3 HVDC 送電ステーション - 制御および保護 (C および P).....	9
4 HVDC 送電制御および保護 – システム レベル ブロック図.....	13
5 HVDC 送電ステーションの制御および保護向け TI ソリューション.....	14
6 まとめ.....	17
7 TI のリファレンス デザイン.....	18
8 その他の参考資料.....	19
9 Revision History.....	20

図の一覧

図 1-1. HVDC 電力伝送ステーション.....	3
図 1-2. HVAC と HVDC 電力伝送のコスト比較.....	4
図 2-1. HVDC 送電ステーションの概要.....	5
図 2-2. HVDC ステーションの主要部品.....	6
図 3-1. HVDC 送電ステーション – 制御および保護.....	9
図 4-1. HVDC 制御および保護システムのブロック図.....	13
図 5-1. HVDC 送電の制御および保護 – TI ソリューション.....	14

表の一覧

表 1-1. HVDC と HVAC の比較.....	2
表 2-1. HVDC コンバータのスイッチング要素の概要.....	7
表 4-1. HVDC ステーション モジュールの説明.....	13

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 HVDC 電力伝送の概要とアーキテクチャ

この資料では、高電圧直流 (HVDC) 電力伝送の概要を説明し、高電圧交流 (HVAC) と比較して HVDC を使用する場合の利点を説明します。このアプリケーション レポートでは、制御システムと保護システムの設計で活用できる HVDC ステーション、製品、ソリューションの制御要件と保護要件に重点を置きます。

1.1 電力駆動 - 発電、送電、配電

電気は、大規模な発電所で発電され、長距離 (100km 超) にわたって高電圧 (110kV 以上) で送電線によって伝送され、配電網のレベル (11kV または 415V) に降圧されて、消費者に電力を供給します。ほとんどの発電所は AC として発電し、変圧器を使用することにより簡単に電圧を上げたり下げたりできるため、システム全体では後から AC を使用しています。発電所からのバルク電力は、高電圧で動作する送電線を使用して消費者に輸送されます。短距離の電力伝送 (100km 未満) には、AC 伝送が広く推奨されています。伝送距離がより長くなると (500km 超)、AC 伝送の使用に制限が出てきます。

1.2 HVAC から HVDC への電力伝送

電力需要は世界的に高まっています。発電所は、コストと環境への影響を最小限に抑えるため、多くの場合エネルギー源の近くに設置されます。これらの発電所の多くは、人口密集地域や都市部から離れた場所にあるため、経済的かつ効率的に発電された電力を輸送することが重要です。これは、生成された電力を高電圧で伝送することにより実現されます。高電圧 (HVAC) は、伝送目的で推奨されています。主に、トランス (発電所での昇圧とサブステーションでの降圧) を使用して、より高い電圧を容易に実現できるためです。

このような需要増大に対応するために、公益事業者は、負荷のバランスを維持するためにグリッドを相互接続することによりシステム性能を向上させることに注目しており、効率を高めるために、より新しい技術 (HVDC または FACTS (Flexible AC Transmission Systems)) を採用することを検討しています。HVAC の長所は、電圧変換がシンプルで容易に電流中断できることです。場合によって、電圧の不安定性や高い伝送損失に、伝送ラインの長さ (500km 超) が関わっている場合には、HVAC 伝送技術を使用できないことがあります。HVAC の短所は、長距離伝送の制限、通電容量、無効電力 (伝送ラインに沿ったさまざまな場所で無効電力補償が必要) による損失、表皮効果 (電流の大部分が導体の外層に見られる、導体内の不均一な電流分布が有効抵抗を増加させる)、および Ferranti (伝送電圧より受信電圧のほうが高い) 効果です。長距離の電力伝送には、HVDC を使用することが解決策です。

1.2.1 HVDC と HVAC の比較

表 1-1 に、新しい HVDC ステーションの設定決定に影響を与える重要なパラメータの DC と AC の比較を示します。

表 1-1. HVDC と HVAC の比較

パラメータ	HVDC	HVAC
送電タイプ	DC	AC
アプリケーション	HV 電力伝送	HV/MV 電力伝送
伝送する電力と距離	距離に依存せず、制限はなし	距離によって異なり、中間変電所が必要
損失	より低く	より高く
伝送コスト (導体とポール)	低コスト: 伝送には 2 本の導体のみが使用され、DC ケーブルは AC ケーブルよりも安価です。	高い伝送コスト
設備コスト	より高く	より低く
ステーション設計の複雑さ	より高く	より低く

HVDC 送電の主な長所と短所には次が含まれます。

- 利点
 - バルク電力伝送のコストが安く、また、回路あたりの電線 1 本につき、より多くの電力を送電可能
 - 表皮効果の影響や電圧安定性の問題がない
 - 非同期相互接続が可能
 - 短絡障害レベルを低減し、障害を除去する時間が短い
- HVDC の短所
 - コンバータが高価
 - 高調波の生成と無効電力要件

- サーキットブレーカが困難

1.2.2 HVDC 送電の主な目的

HVDC 送電は、電力伝送効率を改善し、非同期グリッドの相互接続を強化するために使用されます。HVDC 送電を使用する主な目的は次のとおりです。

- バルク電力伝送: 長距離 (架空線の場合は 500km 超) にわたって、ある地点から別の地点へバルク電力を伝送します。
- 非同期システムの接続: 異なる周波数で動作するグリッド システム間で電力伝送を可能にすることにより、各グリッドの安定性と経済性が向上します。
- 洋上風力発電所の統合: 洋上風力発電所から大規模な負荷消費センターへのバルク電力伝送を簡素化します。
- 双方向 HVDC システム: 同じステーション内の非常に小規模な DC ラインで、整流と反転を実行します

1.3 HVDC 送電ステーションの動作原理

HVDC ステーションでは、コンバータトランスは、生成された AC 電圧を必要なレベルに昇圧します。コンバータステーションは、3 相 AC ネットワークから電力を受けて DC に整流します。DC は架空線 (またはケーブル) を介して転送されます。コンバータステーションの受信側では、インバータが DC 電圧を AC に戻します。AC は、さまざまなコンシューマ エンドでの分配電圧レベルに降圧されます。図 1-1 に、電力伝送プロセスを示します。この技術は、100 ~ 10,000MW の定格電力範囲の転送に適しています。

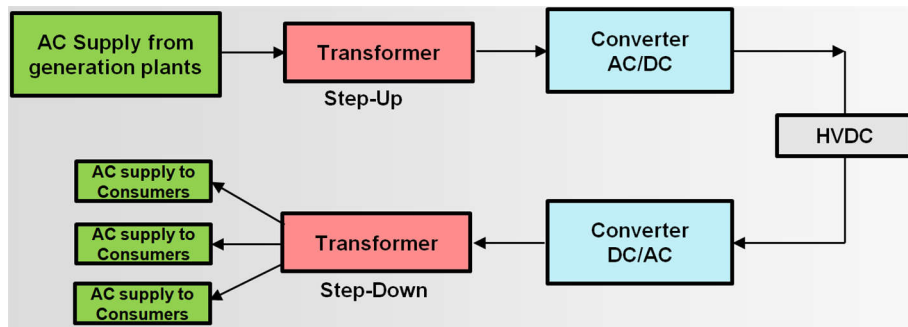


図 1-1. HVDC 電力伝送ステーション

1.4 HVDC 送電の利点

HVDC を使用するとコストが削減され、損失も低減されます (HVAC の 8 ~ 10% に対して 5 ~ 6%)。HVAC のその他の利点には、安定性や制御可能性などがあります。図 1-2 に示すように、損益分岐距離よりも長い距離の場合、HVDC システムはよりコスト効率に優れています。

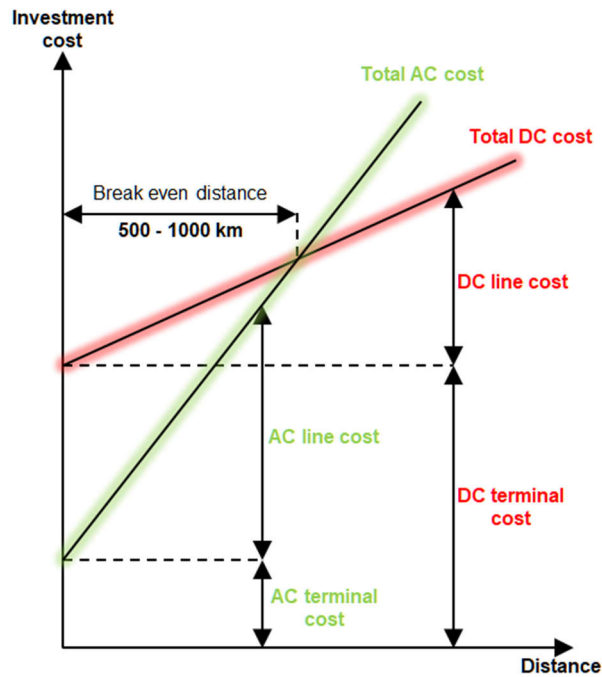


図 1-2. HVAC と HVDC 電力伝送のコスト比較

2 HVDC 送電システム (HVDC ステーション)

HVDC システムは DC を使用して長距離の電力伝送を行います。HVDC 送電システムは、図 2-1 に示すように、以下の機能ブロックに分類されます。

- AC 電圧を昇圧するコンバータトランス
- AC/DC 変換 (整流器) 用のコンバータ ステーション
- DC 送電線
- DC を AC (インバータ) に変換するコンバータ ステーション (頭上または地下)
- AC 電圧を降圧するためのコンバータトランス

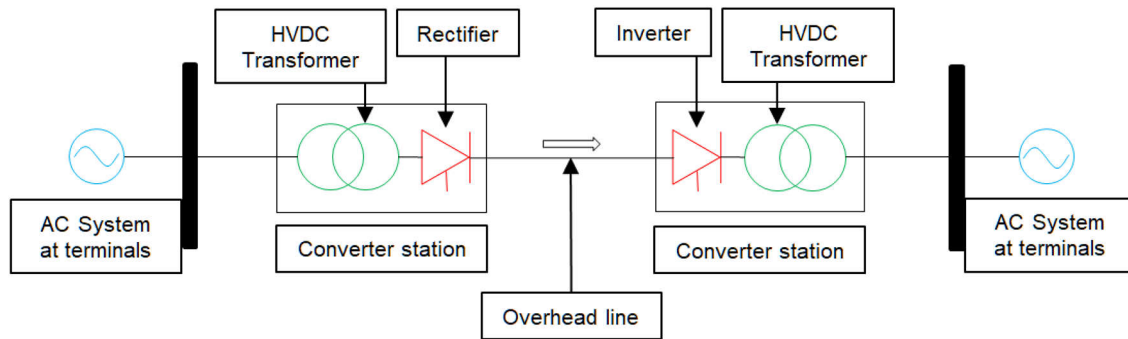


図 2-1. HVDC 送電システムの概要

2.1 HVDC 送電技術

DC を活用するには、変換ステップが必要です。高電圧 AC 電力を DC 電源に変換するには、従来型のライン同期整流コンバータ (LCC) と電圧源コンバータ (VSC) の 2 つの技術を利用できます。LCC は一般的に HVDC Classic と呼ばれ、VSC には HVDC Light (ABB)、HVDC Plus (Siemens)、HVDC MaxSine (Alstom)、Flexible HVDC (China) など、複数の名前があります。

LCC コンバータ技術は、サイリスタという半導体をベースにしています。導通電流を開始するには、サイリスタをオン (起動) にする必要があります。これらのスイッチはどちらの極性でも AC 電圧に耐えられますが、電流は一方向にしか流れることができず、サイリスタのオン時間を調整することにより制限できます。サイリスタをオンにする正弦波の角度は、点火角またはバルブ点火遅延角と呼ばれ、HVDC ステーション間の電力の流れを制御するのに使用されます。

電圧源コンバータ技術は、絶縁型ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) をベースにしています。IGBT は、オン/オフの両方に関して制御できます。VSC 技術では、DC 電流は両方向に流れることができます。これは、電流が一方向に流れる LCC 技術と比較した場合の利点です。VSC の DC 電流フローの双方向能力を考慮すると、コンバータ間の電力フローの方向を変更するためにコンバータの DC 電圧極性を変更する必要はありません。LCC 技術と比較すると、短絡レベルの低い弱いグリッドに VSC を接続することが可能です。

VSC ベースの HVDC では、フィルタバス電圧を基準としてコンバータ AC 電圧の位相角を変更することにより電力を制御できます。一方、無効電力は、フィルタバス電圧を基準にしてコンバータ AC 電圧の基本成分の大きさを変更することにより制御できます。コンバータ電圧のこれら 2 つの側面を制御することにより、4 つの象限すべてでの動作が可能になります。

2.2 HVDC 送電システム (HVDC ステーション) の主要部品

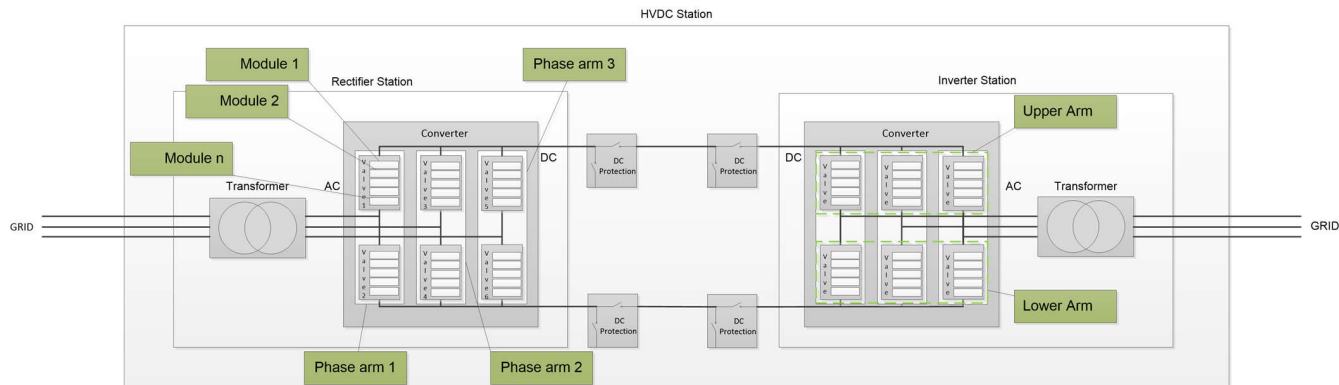


図 2-2. HVDC ステーションの主要部品

HVDC 送電システムの主な構成部品は、使用される変換技術、定格 DC 電圧、および電力定格を考慮して次のとおりです。

- コンバータ
- TAP コントローラなどのコンバータトランス
- 電力伝送線、架空線、または地下ケーブル
- 高調波低減および波形整形
- 保護機器

2.2.1 コンバータ

コンバータは HVDC システムの中核であり、AC/DC と DC/AC の変換を実行します。各 HVDC システムには、両端に 1 つずつ 2 つのコンバータがあります。送信側のコンバータは整流器として機能し、受信側のコンバータはインバータとして機能します。HVDC 技術に基づいて、コンバータは IGBT またはサイリスタ スイッチング素子をベースにできます。

コンバータは通常、1 つまたは複数の IGBT / サイリスタブリッジで構成され、各ブリッジは 6 個の IGBT / サイリスタバルブアームで構成されています。このアームは、システムの電圧と電力定格に基づいて、多数の個別の IGBT / サイリスタを保持しています。電圧と電流をより高くするために、スイッチング デバイス (IGBT またはサイリスタ) を並列と直列に接続します。電圧を上げるには、スイッチング デバイスを直列で接続し、電流を増やすには、スイッチング デバイスを並列で接続します。一般的に使用される HVDC 構成には、モノポーラリンクとバイポーラリンクがあり、HVDC ステーション内のコンバータの数は構成によって異なります。

2.2.2 コンバータバルブアーム

バルブはモジュール型設計を採用しており、現在の 500kV サイリスタバルブとして使用されている最新のライトトリガサイリスタで構成されています。個々のサイリスタモジュールはバルブタワーに配置されます。バルブホールとトランスの配置に応じて、ダブルバルブタワーまたはクアドラブルバルブタワーが可能です。UHVDC アプリケーションでは、バルブホール内のクリアランス要件が大きいため、ダブルバルブタワーのほうが適切です。

バルブアームには、直列 (または並列) に接続された多数のスイッチング素子が含まれています。LCC か VSC かに基づいて、コンバータトポロジはスイッチング素子としてサイリスタまたは IGBT を使用します。スイッチング素子の数は、HVDC ステーションの電圧レベルによって異なります。

- サイリスタ LCC バルブ: サイリスタバルブは、アプリケーションやメーカーに応じて、さまざまな方法で蓄積できます。しかし、サイリスタバルブを配置する最も一般的な方法は、3 つのクアドラブルバルブを持つ 12 パルスグループにあります。個々のサイリスタバルブは、一定量の直列接続サイリスタとそれらの補助回路で構成されています。制御装置と各サイリスタ間の通信はすべて光ファイバで行われます。
- IGBT VSC バルブ: VSC コンバータは、2 レベルまたはマルチレベルのコンバータ、位相リアクタ、AC フィルタで構成されています。コンバータブリッジ内の各バルブは、一定数の直列接続された IGBT とその補助電子回路で構成されています。VSC バルブ、制御装置、冷却装置は、輸送と設置を非常に簡単にするエンクロージャ (標準的な輸送コンテナなど) にあります。最新の HVDC バルブはすべて水冷式で空気絶縁されています。

2.2.2.1 コンバータ位相アーム

コンバータ位相アームは 2 本のバルブアーム (アップアームとロアアーム) で構成され、AC 電源コンバータトランスの入力または出力に接続されている。各位相には 2 本のアームがあります。AC は、3 相構成でグリッドに沿って伝送されます。3 相コンバータには、6 個のバルブで構成される 3 相アームがあります。表 2-1 に、200kV HVDC コンバータに必要なスイッチング素子の数を示します。

表 2-1. HVDC コンバータのスイッチング要素の概要

コンバータタイプ	スイッチング素子	定格電圧 kV	HVDC 定格電圧 kV	バルブアームの数	バルブあたりのスイッチング素子の概数	コンバータあたりのスイッチング素子の近似数
LCC	サイリスタ	6.5	200	12	35	420
VSC	VSC	1.5	200	6	135	810

表 2-1 に、HVDC システムの複雑性を理解するための概算、バルブ / コンバータを構築するために相互接続されているデバイス数、200kV 電圧レベルを使用する 200 ~ 250MW 電力伝送システム用のデバイス数を示します。電圧定格に応じて、IGBT / サイリスタは直列に接続され、電流定格に基づいて接続されます。IGBT / サイリスタは並列に接続されます。

2.2.3 コンバータトランス

コンバータトランスは、AC バスバーの電圧を、コンバータに必要な入力電圧に変換します。トランスは、AC 側と DC 側の間のインターフェイスです。したがって、主絶縁は、バルブ側巻線とグラウンドの間の AC 電圧と DC 電圧の電位の両方によってストレスを受けます。これらは、高い高調波電流と電圧ストレスに耐えるように設計された特殊な種類のトランスです。また、HVDC 操作の最適化を可能にするタップチェンジャを備えています。コンバータトランスは AC システムと DC

システム間のガルバニックバリアとして機能し、AC システムに DC 電位が入ることを防止します。HVDC 送電が利用可能かどうかは、コンバータトランスの性能によって決まります。

HVDC 送電では、コンバータ側とインバータ側で大電圧制御を行う必要があります。コンバータトランスは通常、電圧レギュレーションに役立つようにオンロード タップ チェンジャを搭載しています。タップ範囲が広い (約 25% ~ 30%) ため、わずかなステップで電源電圧の必要な調整を行えます。オン負荷のタップ チェンジャ (OLTC) を使用して、トランス巻線比を変更し、点火角度を制御し、電圧変動を補償できます。OLTC は、コンバータが整流器として使用されている場合の DC 出力電圧、コンバータがインバータとして使用されている場合のグリッドへの AC 電圧を制御するために使用されます。トランスのタップ比を操作することにより、コンバータが過剰変調または低変調になることを防止できます。コンバータを過剰変調領域または低変調領域で動作させると、高調波性能に悪影響を及ぼす可能性があります。

2.2.4 電力伝送ライン

伝送ラインは、架空線および地下 (または海底) ケーブルである場合があります。架空線のほうが一般的で、通常、地下ケーブルより安価です。

導体はタワーやポールから頭上に吊り下げられており、一般に絶縁されていません。架空ケーブルの課題には、ライン張力、一時的な低下、過負荷による発熱、環境が変化することによる負荷容量の変化が挙げられます。ケーブルは常に絶縁されており、一般的に地下アプリケーションで使用されます。地下ケーブルは、架空線を設置しにくい場所 (例えば水域を横断する場所) で使用されます。また、風や氷の嵐に対する耐性があるというメリットから、近年ますます注目されています。

2.2.5 リプル制御、高調波制御、波形整形用部品

HVDC ステーションが確実に動作要件を満たし、必要な電力出力を供給するためには、整流と反転に加えて、電圧レギュレーション、高調波制御、無効電力補償、波形整形が必要です。接続されている機器には次が含まれます。

- 平滑化リアクトル:これは、DC ラインに接続されたコイルであり、DC リンクのリップルと高調波を低減し、障害発生時の過電流を制限して、軽負荷時の電流が不連続になることを防止するとともに、整流障害の防止にも役立ちます。
- 高調波フィルタ:コンバータは、電圧と電流の高調波を生成します。これらの高調波は、コンデンサや付近の発電機の過熱や、通信システムとの干渉を引き起こす可能性があります。これらの高調波を低減するために、高調波フィルタを使用します。
- 無効電源:定常状態では、コンバータから引き出される無効電力は伝送される有効電力の約 10 ~ 50% であり、シャントコンデンサバンクから供給されます。
- アース電極:電極は、アースへの接続を提供する導体です。電流密度と表面電圧勾配を最小限に抑えるため、表面が大きくなっています。

2.2.6 保護機器

予防メンテナンス活動や機器整備時にオペレータの安全を確保するため、HVDC ラインと直列に接続されたスイッチの切断やコネクタの切断、グランディング スイッチ、AC/DC サーキットブレーカなど、多数の保護機器が備わっています。

3 HVDC 送電ステーション - 制御および保護 (C および P)

各 HVDC コンバータ ステーションには、正常な条件下でも異常な条件下でも十分に動作するように設計された、制御および保護システムが装備されています。この制御システムは、自己保護機能を備え、効率的で安定した動作を実行し、システムの安全性を損なうことなく最大の電力制御の柔軟性を実現するように設計されています。HVDC の C および P は、さらに HVDC 送電システムと AC ネットワーク間に有害な相互作用がないことを保証します。このような相互作用は、HVDC コンバータ、AC ネットワーク保護システム、または伝送システムのユーザーに悪影響を及ぼす可能性があるものです。両方のコンバータ (整流器とインバータ) の制御および保護システムはできるだけ同一になるように設計されています。

C および P システムは、測定、処理、切り替え、表示、および通信システムを含む、すべての重要なシステムに対して完全な冗長性を備えています。コンバータ制御は、フィルタ、コンデンサ、リアクタ バンクの自動切り替え機能を組み合わせ、目的の電力伝送と AC バス電圧の振幅を実現します。高電圧デバイスへのオープン/クローズ コマンドは、ブレーカ、ディスコネクタ、およびグラウンド スイッチのステップ外れ動作を防止するために、制御にインターロックされています。また、禁止されているシステムやスイッチ ヤード構成を防ぐためのインターロックも設置されています。インターロックは、バルブ ホールやフィルタ (通行しない部分) への人のアクセスを防止するために、ステーション制御によって管理されるインターロックによって提供されます。図 3-1 に、HVDC ステーションで使用される制御および保護の概要を示します。

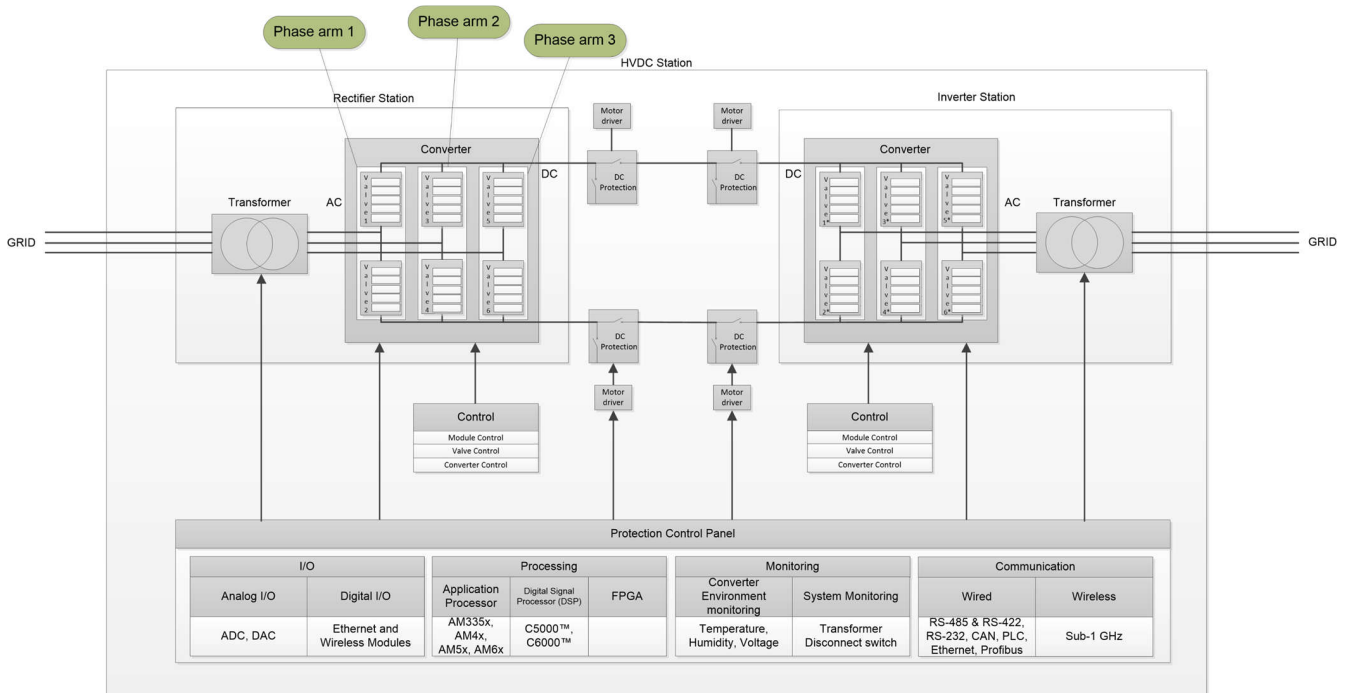


図 3-1. HVDC 送電ステーション - 制御および保護

3.1 HVDC 送電ステーションの制御

HVDC リンクの主な利点は、コンバータの制御を介して転送する電力を迅速に制御できることです。最新のコンバータ制御は高速であるだけでなく非常に信頼性が高く、ラインおよびコンバータの故障に対する保護に使用されています。制御システムは、セクション 3.1.1 で示したように階層的に構造化されています。

3.1.1 システム コントロール

このシステム機能には、主に以下に示す監視制御およびデータ アクイジション (SCADA) 機能が含まれます。

- 制御、表示、アラーム
- 時間同期とインターロック
- 接続解除スイッチを使用した連続絶縁
- 電圧選択、共振、位相検出
- 計測用変圧器の監視

- 特殊な保護および動作トリップ方式に対するインターフェイス
- IEC61850、IEC60870-5-101、IEC60870-5-104 などの標準グリッド プロトコルを使用する通信
- AC/DC の電圧 / 電流、有効電力 / 無効電力、高調波、他のパラメータを含めた測定機能
- 過渡フォルトの記録とケーブル監視
- コンバータ冷却およびバルブ ホール火災検知
- 補助電源と電源監視

3.1.2 マスタ制御

一度に HVDC 送電システムのアクティブな制御を持つのは 1 つのコンバータステーションだけであり、これはマスタステーションと呼ばれます。マスタステーションは、次のようにディスパッチコントロールを実行します。

- 一定の有効電力、無効電力、電圧制御を含む、コンバータ制御モード
- HVDC 送電の起動とシャットダウン
- 周波数制御
- 電源の立ち上げと電力反転
- 非常電力制御 / 電力要求の無効化
- 無効電力補償と高調波フィルタ制御
- メカニズムの変更
- 自動ポールスイッチ

3.1.3 ステーション制御

ステーション制御は、HVDC システムをお客様の電源システムに統合するために必要な機器と、両方のポールに共通する機能を管理します。ステーション制御の主な機能は次のとおりです。

- AC および DC の切り替え制御
- 有効電力および無効電力の制御
- AC 電圧制御
- オン負荷トランス タップ チェンジャ制御
- DC 電流と電圧の制御
- 安定性、動作状態、スイッチング シーケンス制御
- バルブ点火制御

3.1.4 ポールまたはコンバータ制御

ポール制御は、HVDC 制御システム中核のです。DC 電力のフローは、オペレータの設定ポイントに制御されます。AC システムの定常状態および動的性能もポール制御によって強化されています。パワー スイング安定化、周波数制限制御、およびサブ同期共振ダンピングなどの機能を利用できます。ポール制御システムの主な機能は、オペレータが選択した値で伝送電力を維持することです。これは、システムの外乱時の最適な応答で実現されており、あらゆるシステム構成に対して堅牢かつ安定的です。通常の動作中、DC 電流制御は整流器で有効になり、インバータで DC 電圧制御が有効になります。バックアップ絶滅角度制御は、AC システム内の外乱に起因するインバータでの整流障害を最小限に抑えるための安全マージンを提供します。AC システムの外乱中に、整流器ステーションが順序付き DC 電流を供給できない場合、インバータ電流制御機能がアクティブになります。コンバータ制御は、電流順序の変換を、点火角度順序または PWM のデューティサイクル、タップ チェンジャ制御、その他の保護シーケンスに調整します。

3.1.5 バルブベース制御 VBC (バルブ ユニット制御)

VBC は、循環電流とコンデンサ電圧を制御し、コンバータバルブを保護して、コンバータバルブを監視する機能を備えています。バルブ制御は、バルブ内のパワー エレクトロニクス デバイスの導通を制御 / 監視するためのポール (コンバータ) 制御からのコマンドおよび信号を受信します。主な機能は、コンバータ制御システムと、HVDC パワー コンバータ内の個別のパワー エレクトロニクス モジュールの多く (数百以上) をつなぐことです。バルブ ベース エレクトロニクス (VBE) は、業界標準のパッシブ光通信技術を使用して多数のパワー エレクトロニクス モジュールと通信します。この技術により、各モジュールを厳密に同期し、厳しい時間制約を満たし信頼性の高い方法で制御および監視でき、冗長性を損なわずに、必要となるファイバの数を最小限に抑えられます。VBC で処理する機能には、コンバータ制御から受信したコマンドに基づいたブリッジアームのリファレンス電圧の変調、上下のブリッジアーム間および異なる位相間の循環電流を含む電

流バランス制御、適切な範囲内でのコンデンサの電圧を確保する適切な稼働サブモジュール (SM) の計算による電圧バランス制御、バルブとブリッジアームの保護と監視が含まれます。

3.2 HVDC 送電ステーション保護

コンバータ保護機能は、バルブ ホール内のコンバータトランスの二次障害と、バルブのオーバーストレスにつながる故障を検出します。コンバータステーションおよび保護システムは、コンバータおよび隣接する AC サブステーションの AC 保護が DC システムの通常、過渡、およびダイナミック挙動の影響を受けないように設計されています。

HVDC コンバータステーションの保護および制御システムは、機器生じた 1 つの故障が HVDC システム全体の障害を引き起こさないように設計されています。HVDC 施設は、個別に保護されたゾーンと重複するゾーンに分けられます。保護機器は、指定されたゾーン内の特定のタイプの障害にのみ作用し、他のタイプの障害または関連するゾーン外で起きた障害に対しては、安定するものとします。保護ゾーンはそれぞれ、可能な場合は異なる保護原理を使用して、メインとバックアップの 2 つの保護機能によって保護されています。異なる保護原理を使用できない場合は、保護機能が重複して使用されます。保護は可能な限り制御から独立しています。保護システムは常にアクティブな状態を維持し、個別の独立した電源から電力を供給する必要があります。

保護システムは、以下の機能を組み込んだ完全に冗長な保護方式で構成されています。

3.2.1 HVDC ステーションの AC セクションの保護

HVDC ステーションの AC 保護ゾーンには、次が含まれます。

- AC バスバーおよびライン ゾーンの保護
- AC フィルタ ゾーンの保護
- コンバータトランスのゾーン保護

3.2.2 HVDC ステーションの DC セクションの保護

HVDC ステーションの DC 保護ゾーンには、次が含まれます。

- バルブおよび補助システムの保護
- DC コンバータ / ポール ゾーンの保護
- HVDC 送電リンク / バスバー ゾーン保護
- DC 平滑化フィルタ、高調波フィルタ、およびグラウンディング スイッチ ゾーン保護
- サークットブレーカ障害保護

3.2.3 機器の保護および監視

HVDC ステーションで使用されるその他の機器には、次のものがあります。

- コンバータトランスの溶存ガス (DGA) と温度監視
- コンバータトランスの TAP コントローラ
- コンバータ冷却システム
- コンデンサ バンク
- バルブの部分放電
- 補助電源バッテリーバックアップ

冗長システムには、HVDC ステーションの運用中に保護機能を失うことなくシームレスな移行を確実にするための、切り替えロジックが実装されています。

HVDC コンバータステーションの保護機能は、AC バスバー、高調波フィルタ、コンバータトランス、ポール / コンバータ、DC ニュートラル フィルタと DC フィルタ用の保護ソリューションで構成されています。この保護機能は、HVAC および HVDC システム上の故障した機器を検出して除去します。保護機能は、フィールドレベルの電流や電圧などのアナログ入力を使用します。トリップ コマンドはそれぞれのブレーカに送信され、アラームは HMI のシーケンス イベント記録レコーダで生成されます。

3.2.4 サンプリングと DC フォルト検出

IEC61869-9 規格に従い、HVDC アプリケーションに必要なサンプリングは 96,000Hz です。通常、フォルト検出は、500,000Hz のサンプリングに変換する 2 μ s になるように設計されています。代わりに、高速コンパレータを使用して高速フォルト検出を実施することもできます。

3.3 フォルトの記録と監視

フォルトレコーダは、コンバータステーション内の AC システムと DC システムの両方に装備されています。過渡フォルトレコーダ (TFR) は、HVDC ステーションの制御と保護の一環として統合されています。TFR は電源システムを継続的に監視し、範囲外の状態ではアラームを出力し、オフラインの分析イベントを記録します。

3.4 コントロール パネルおよび保護パネル

すべての制御機器と保護機器は集中制御パネルに収容され、パネルと HVDC システム間の通信には光ファイバ インターフェイスが使用されます。必要な冗長性と切り替えロジックは、C パネルと P パネル内に実装されています。

3.5 診断および監視

HVDC ステーション内に接続されているコンバータや他の機器の部分放電が監視され、予測診断を実行します。導体の温度監視機能を使用してラインの動的な定格と診断を実現し、光ファイバ ベースの分散型温度センシング DTS を使用して測定します。HVDC ステーションの環境モニタリングは、除氷および動的負荷管理用に提供されています。

4 HVDC 送電制御および保護 – システム レベル ブロック図

図 4-1 に、HVDC ステーションの制御と保護のブロック図を示します。多くの機器はコントロール パネル内に配置され、一部は保護対象の機器の近くに配置されています。

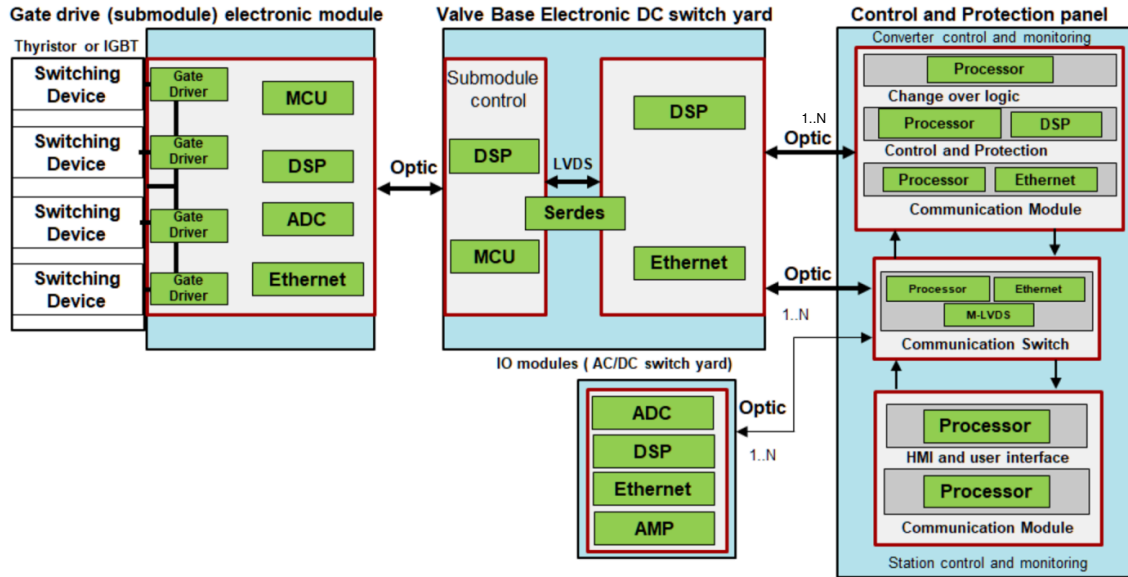


図 4-1. HVDC 制御および保護システムのブロック図

HVDC ステーションとコントロール パネル内では、次のモジュールが相互接続され、必要な保護および制御機能が実行されます

表 4-1. HVDC ステーション モジュールの説明

モジュール	アプリケーション	ロケーション
ゲートドライブ	サイリスタまたは IGBT モジュールを駆動します。ゲートドライブ、温度、電圧測定用のロジックを実装します。サブモジュールとも呼ばれます	各 IGBT またはサイリスタ サブモジュールには、関連付けられたゲートドライブ ユニットがあります。ゲートドライブ ボードの数は、コンバータの電圧と電力定格によって異なります。
バルブ制御	多数のサブモジュールがバルブとして直列に接続されています。バルブ制御電子回路を使用して、ゲートドライブ ボードの制御に対するコマンドを提供します。	各バルブには、HVDC 定格に応じて 1 つまたは複数のバルブ制御電子回路が含まれている場合があります。
コンバータとボール制御	コンバータ ブリッジは 6 つ以上のバルブで構成されています。コンバータ制御は、必要な電気パラメータを計算し、必要な制御コマンドをバルブ制御に提供します。ボール制御はグリッド AC 電圧を管理し、構成された DC 出力電圧を維持します。	コンバータおよびボール制御電子回路は、制御および保護パネルの一部です。複数のデジタル信号処理モジュールを、コンバータおよびボール制御モジュールとして内蔵しています。パフォーマンスを向上させ、信頼性を高めるために冗長性が提供されます。
ステーション レベルの制御と保護	コンデンサ バンクとフィルタの制御によって高調波と無効電力を制御します。正常および異常な動作時に、HVDC ステーションを保護します	コントロール パネルおよび保護パネルの一部。複数のデジタル信号処理モジュールを、コンバータおよびボール制御モジュールとして内蔵しています。パフォーマンスを向上させ、信頼性を高めるために冗長性が提供されます。
通信スイッチ	HVDC ステーション内のさまざまなシステムを、高速光ファイバ ベースのイーサネット インターフェイスを使用して接続します	コントロール パネルおよび保護パネルの一部。冗長性を備えた複数の通信スイッチが使用されます。
アナログ入出力 (I/O) モジュール	HVDC ライン、コンバータトランス、リアクタ、ブレーカ、キャパシタ バンク、および保護と監視のためのフィルタの電氣的パラメータを測定するために使用します	監視対象の機器の近くにある HVDC ステーションに沿って接続されており、数値は電力定格によって異なります

5 HVDC 送電ステーションの制御および保護向け TI ソリューション

TI は、HVDC ボードまたはモジュールの設計時にお客様が活用できる、アナログ、電源、インターフェイス、絶縁、プロセッサ、マイコンおよび DSP ソリューションを提供します。図 5-1 に、さまざまな HVDC モジュール用の主なソリューションの一部を示します。

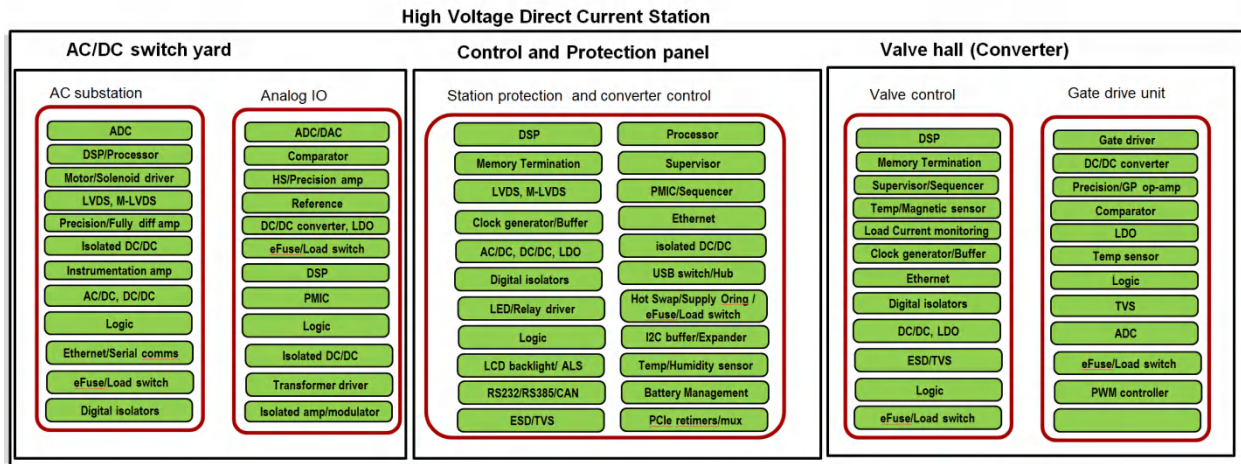


図 5-1. HVDC 送電の制御および保護 – TI ソリューション

5.1 TI 製品

TI 製品の詳細については、以下のセクションのリンクからご覧ください。

5.1.1 アナログ

TI は、高精度または高速 ADC、高精度または高速アンプ、高速コンパレータ、環境監視用のセンサなど、設計された幅広いアナログ設計を提供しています。製品に関する情報は、次のリンクからご覧ください。

- <http://www.ti.com/data-converters/adc-circuit/precision-adcs/overview.html>
- <http://www.ti.com/amplifier-circuit/op-amps/precision/overview.html>
- <http://www.ti.com/amplifier-circuit/special-function/fully-differential/overview.html>
- <http://www.ti.com/amplifier-circuit/current-sense/overview.html>
- <http://www.ti.com/amplifier-circuit/comparators/overview.html>
- <http://www.ti.com/sensors/overview.html>

ADS8588H

ADS8588H デバイスは 8 チャンネルの統合データ収集 (DAQ) システムで、16 ビットの逐次比較型 (SAR) A/D コンバータ (ADC) を基礎としています。すべての入力チャンネルが同時にサンプリングされ、チャンネルごとに最大 500kSPS のスループットを実現しています。

5.1.2 組み込みプロセッシング

TI は、制御 / 保護アルゴリズム処理用の DSP や、標準的な通信プロトコルおよびユーザー インターフェイスの実装用の ARM ベース プロセッサを含む、広範な組み込みプロセッサ ソリューションを提供しています。製品に関する情報は、次のリンクからご覧ください。

- <http://www.ti.com/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/overview.html#portfolio>
- <http://www.ti.com/processors/digital-signal-processors/c6000-floating-point-dsp/overview.html>
- <http://www.ti.com/processors/sitara-arm/overview.html>

66AK2HXX

66AK2Hxx プラットフォームは、クワッド ARM Cortex-A15 プロセッサと、KeyStone II アーキテクチャを使用した最大 8 個の TMS320C66x 高性能 DSP を組み合わせたものです。66AK2H14/12/06 デバイスは、最大 5.6GHz の ARM と 9.6GHz の DSP 処理能力を備えており、セキュリティ、パケット処理、イーサネット スイッチングを、マルチチップ ソリューションよりも低い消費電力で実現します。

5.1.3 電源とゲートドライバ

TI は、AC/DC、DC/DC、ゲートドライバ、絶縁型パワー モジュール、LDO など、多様な電源ソリューションを提供しています。製品に関する情報は、次のリンクからご覧ください。

- <http://www.ti.com/power-management/power-switches/overview.html>
- <http://www.ti.com/power-management/gate-drivers/overview.html>
- <http://www.ti.com/power-management/gate-drivers/isolated-gate-drivers/products.html>
- <http://www.ti.com/power-management/offline-isolated-dcdc-controllers-converters/isolated-power-converters/products.html>
- <http://www.ti.com/power-management/offline-isolated-dcdc-controllers-converters/pwm-resonant-controllers/products.html>
- <http://www.ti.com/power-management/non-isolated-dc-dc-switching-regulators/step-down-buck/buck-modules-integrated-inductor/power-modules-portfolio.html>

LMZ30604

LMZ30604 パワー モジュールは、4A の DC/DC コンバータをパワー MOSFET、シールド付きインダクタ、およびパッシブ部品とともに低プロファイルの QFN パッケージに実装した、使いやすい集積電源ソリューションです。この全電源ソリューションはわずか 3 個の外付け部品で構築でき、ループ補償や磁気部品の選択が不要になります。

5.1.4 高速オンボード インターフェイスおよび外部通信

TI は、低速 / 高速通信を対象としたオンボード / 外部インターフェイス向けに、広範なインターフェイス ソリューションを提供しています。製品に関する情報は、次のリンクからご覧ください。

- <http://www.ti.com/interface/ethernet/overview.html>
- <http://www.ti.com/interface/usb/overview.html>
- <http://www.ti.com/interface/lvds-m-lvds-pecl/overview.html>
- <http://www.ti.com/interface/overview.html>
- <http://www.ti.com/wireless-connectivity/simplelink-solutions/sub-1-ghz/products.html#p1694=Smart%20RF%20Transceiver;UHF%20Transceiver>

SN65LVDS047 および SN65LVDS048A

SN65LVDS047 はクワッド差動ラインドライバで、低電圧差動信号 (LVDS) の電気的特性を実装しています。

SN65LVDS048A はクワッド差動ライン レシーバで、低電圧差動信号 (LVDS) の電気的特性を実装しています。

DP83869

DP83869HM デバイスは、10BASE-Te、100BASE-TX、1000BASE-T イーサネット プロトコルをサポートする、PMD サブレイヤを内蔵した、堅牢で完全な機能を持つギガビット物理レイヤ(PHY)トランシーバです。DP83869 は、1000BASE-X および 100BASE-FX ファイバ プロトコルもサポートしています。

5.1.5 基板レベルの絶縁と保護

TI は、基本絶縁または強化絶縁を採用した、アナログまたはデジタルの幅広い絶縁設計を提供しています。製品に関する情報は、次のリンクからご覧ください。

- <http://www.ti.com/isolation/digital-isolators/overview.html>
- <http://www.ti.com/isolation/isolated-interfaces/rs-485-transceivers/overview.html>
- <http://www.ti.com/isolation/isolated-interfaces/can-transceivers/overview.html>
- <http://www.ti.com/isolation/transformer-drivers/products.html>
- <http://www.ti.com/isolation/isolated-amplifiers/overview.html>
- <http://www.ti.com/interface/circuit-protection/esd-by-interface.html>
- <http://www.ti.com/interface/circuit-protection/overview.html>

ISO224

ISO224 は高精度の絶縁型アンプで、最大 5kVRMS の絶縁耐圧を持ち、きわめて寿命が長く、消費電力が低い絶縁バリアにより、入力側と出力側の回路が分離されています。ISO224 の入力は、産業用アプリケーションで広く使用される $\pm 10V$ の信号の高精度センシングに最適化されています。このデバイスは、ハイサイドにおいて単一電源で動作します。この独自の機能により、絶縁型電源の設計が簡素化され、システムコストが低減されます。内蔵のハイサイド電源電圧検出機能により、システムレベルの診断が簡単になります。

UCC12050

UCC12050 は、5kVRMS の強化絶縁を備えた DC/DC コンバータであり、出力電圧が適切にレギュレートされたバイアス電源を必要とする絶縁された回路に、高効率の絶縁電力を供給するよう設計されています。このデバイスは、独自のアーキテクチャによって変圧器と DC/DC コントローラを統合しており、500mW (標準値) の絶縁電力を高効率かつ低 EMI で供給できます。このデバイスはイネーブルピン、同期機能、5V または 3.3V 安定化出力選択機能 (ヘッドルームを選択可能) も備えています。UCC12050 は、高さ 2.65mm (標準値) の幅広 SOIC パッケージで供給される薄型の小型ソリューションです。

AMC3301

AMC3301 は、デバイスのローサイドから単一電源で動作できる完全統合型絶縁 DC/DC コンバータを備えた高精度絶縁型アンプです。AMC3301 の入力は、シャント抵抗または低電圧レベルの信号との直接接続用に最適化されています。内蔵の絶縁 DC/DC コンバータにより、このデバイスはスペース制約が厳しいアプリケーション向けの独自のソリューションになっています。

ISO774x

ISO774x デバイスは、高性能のクワッド チャネル デジタル アイソレータであり、UL 1577 準拠で 5000V_{RMS} (DW パッケージ) および 3000V_{RMS} (DBQ パッケージ) の絶縁定格を備えています。ISO774x デバイスは、CMOS または LVCMOS デジタル I/O を絶縁しながら、低消費電力で高い電磁気耐性と低い放射を実現します。各絶縁チャネルは、二酸化ケイ素 (SiO₂) の二重の容量性絶縁バリアで分離されたロジック入力および出力バッファを備えています。入力電力または入力信号が失われた場合のデフォルト出力は、接尾辞 F のないデバイスでは High、接尾辞 F のあるデバイスでは Low です。

ISOW64xx、ISOW3080、ISOW1050

ISO-W デバイスファミリ (ISOW64xx、ISOW3080、ISOW1050) は、DC/DC コンバータを内蔵した信号アイソレータであり、1 つのデバイスに統合されています。これにより、絶縁型電源を生成する必要がなくなり、設計とレイアウトが大幅に簡単になり、スペースとコストを大幅に節約できます。このほか、このデバイスファミリは優れた EMC 性能を発揮するように設計されています。ISOW64xx は電源を内蔵したデジタル アイソレータ、ISOW3080 は電源を内蔵した絶縁型 RS485、ISOW1050 は電源内蔵の絶縁型 CAN です。これらは、V_{ISO} = 5000V_{RMS} の強化絶縁型デバイスです。この

6 まとめ

HVDC には、損失を低減し転送距離を延長できるという利点があります。送電会社は、バルク電力、長距離送電において、HVAC から HVDC に移行しています。TI は HVDC 送電システムの最終製品向けに、アナログ、デジタル、インターフェイス、保護の各製品とリファレンス デザイン ソリューションを提供しています。HVDC (高電圧直流) ステーションの制御機器と保護機器に加えて、環境の監視、バルブの冷却、除氷、煙探知、セキュリティ向けの他の機器も HVDC (高電圧直流) ステーションに統合されています。

7 TI のリファレンス デザイン

- **高効率、低放射の絶縁型 DC/DC コンバータを使用したアナログ入力モジュールのリファレンス デザイン**

このリファレンス デザインは、絶縁型アンプ用の絶縁型電源を生成し、絶縁された電圧と電流を測定するための簡単なアーキテクチャです。5V 入力および構成可能な 5V/5.4V 出力 (低ドロップアウトレギュレータ (LDO) のためのヘッドルーム) で動作する完全統合型強化絶縁 DC/DC コンバータにより、絶縁された電力を生成します。入力範囲が $\pm 50\text{mV}$ である複数の絶縁型アンプは、複数のチャンネル絶縁入力という形で構成済みであり、これらのアンプに接続した複数のシャントを使用して電流を測定します。入力範囲が $\pm 250\text{mV}$ または $\pm 12\text{V}$ である複数の絶縁型アンプは、複数のグループ絶縁入力という形で構成済みであり、これらのアンプに接続した電位デバイダの出力を使用して電圧を測定します。これらの絶縁型アンプの出力は、24 ビットのデルタ シグマ A/D コンバータ (ADC) に直接接続する方法、またはゲイン アンプを使用して $\pm 10\text{V}$ にスケール化した後、16 ビット SAR ADC に接続する方法で性能を評価できます。オンボードのデジタル診断機能は、信頼性の向上と、性能の強化に貢献します。

- **保護リレー モジュール向けの、診断機能を搭載した非絶縁型電源アーキテクチャのリファレンス デザイン**
- **保護リレー プロセッサ モジュール用の高効率電源アーキテクチャのリファレンス デザイン**

このリファレンス デザインは、絶縁型アンプ用の絶縁型電源を生成し、絶縁された電圧と電流を測定するための簡単なアーキテクチャです。5V 入力および構成可能な 5V/5.4V 出力 (低ドロップアウトレギュレータ (LDO) のためのヘッドルーム) で動作する完全統合型強化絶縁 DC/DC コンバータにより、絶縁された電力を生成します。入力範囲が $\pm 50\text{mV}$ である複数の絶縁型アンプは、複数のチャンネル絶縁入力という形で構成済みであり、これらのアンプに接続した複数のシャントを使用して電流を測定します。入力範囲が $\pm 250\text{mV}$ または $\pm 12\text{V}$ である複数の絶縁型アンプは、複数のグループ絶縁入力という形で構成済みであり、これらのアンプに接続した電位デバイダの出力を使用して電圧を測定します。これらの絶縁型アンプの出力は、24 ビットのデルタ シグマ A/D コンバータ (ADC) に直接接続する方法、またはゲイン アンプを使用して $\pm 10\text{V}$ にスケール化した後、16 ビット SAR ADC に接続する方法で性能を評価できます。オンボードのデジタル診断機能は、信頼性の向上と、性能の強化に貢献します。

- **グリッド用途での過渡保護用、TVS ベースのフラット クランプ リファレンス デザイン**
- **ファイバ/ツイストペア インターフェイス付き、EMI/EMC 準拠 10/100Mbps イーサネット ブリックのリファレンス デザイン**
- **グリッド向け、銅線/光ファイバ 100BASE-FX または 1000BASE-X メディア コンバータのリファレンス デザイン**

このリファレンス デザインは、DP83849 評価ボードを使用して 10/100BASE-TX から 10/100BASE-FX へのメディア コンバータを実装するための方法を詳しく示しています。このコンバータにより、銅線ベースの従来機器を光ファイバ ネットワークに容易に接続できます。銅線ベースのイーサネット (10/100BASE-TX) はグリッドのローカル エリア ネットワーク (LAN) で広く使用されていますが、通信可能な距離は限られています。光ファイバ ネットワークは技術が確立しており、継続的にコストを削減できます。公益事業者にとって、光ファイバ ネットワークを使用して広範囲の機器を管理することは、実現可能でコスト効率に優れており、通信の高速化、長距離化、信頼性向上につながります。

- **3 レベル、3 相 SiC の AC/DC コンバータのリファレンス デザイン**
- **ゲートドライバリファレンス デザイン、パラレル IGBT 用、短絡保護および外部 BJT バッファ付き**
- **小型デルタ シグマ変調器搭載、強化絶縁型位相電流センスのリファレンス デザイン**
- **電流、電圧、デザインに関するガイドを備えた強化絶縁型 3 相インバータのリファレンス デザイン**

8 その他の参考資料

- <http://www.ti.com/applications/industrial/grid-infrastructure/overview.html>
- テキサス インストルメンツ:『システム レベルの ESD 保護ガイド』
- テキサス インストルメンツ:『統合された電源およびデジタル絶縁設計を活用して設計性能を向上』、アプリケーション ノート
- https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2017/03/07/exploring-high-voltage-transmission-part-1-line-commutated-converters
- https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2017/03/14/exploring-high-voltage-transmission-part-2-voltage-source-converters
- テキサス インストルメンツ:『ゲート駆動電流を増加させる 2 とおりの方法の比較分析』

9 Revision History

Changes from Revision B (September 2021) to Revision C (May 2026)	Page
• タイトルを更新.....	0
• デバイスの段落を追加.....	16
• 参照を追加.....	19

Changes from Revision A (June 2020) to Revision B (September 2021)	Page
• ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新。.....	2

Changes from Revision * (May 2020) to Revision A (June 2020)	Page
• セクション 1.1 で更新が行われました。.....	2
• セクション 1.2.1 で更新が行われました。.....	2
• セクション 2.2.2.1 で更新が行われました。.....	7
• セクション 6 で更新が行われました。.....	17

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