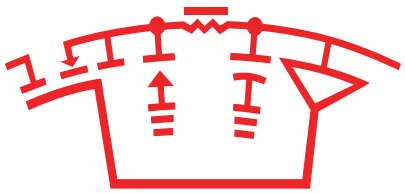
参考資料



Power Supply Design Seminar

高電圧最終製品のための空間距離と沿面距離の明確化

Texas Instruments

Reproduced from
2024 Texas Instruments Power Supply Design Seminar
SEM2600
Topic 2
Wei Zhang and Thomas LaBella
Literature Number: JAJP099

Power Supply Design Seminar resources
are available at:
www.ti.com/psds

安全性や設計のガイドラインを維持しながら、できるだけ高い電力密度を達成するには、高電圧向けプリント基板 (PCB) の間隔と IC パッケージを注意深く選択する必要があります。本セッションでは、テレコム、サーバー、無線インフラ、モータードライブ、ソーラーインバータ、充電パイル、コンシューマ向け AC/DC、EV/HV の各アプリケーションを含め、一般的な最終製品に関する検討事項をまとめ、早見表をご紹介します。

はじめに

安全性と設計のガイドラインに準拠しながら、できるだけ高い電力密度を達成するためには、高電圧の PCB 間隔と IC パッケージの選択がますます重要になっています。しかしながら、課題はさまざまな角度からもたらされます。設計者は、以下について理解しておく必要があります。

- 多くの専門用語と、それらの沿面距離と空間距離への影響。
- 通常の動作時の過渡電圧と非繰返し過渡電圧の明確な違い。
- 1 次側のエネルギー源に対する機器の位置による影響。
- 沿面距離、空間距離、PCB 間隔に対応する複数の業界規格が存在し、補完的な規格もあれば、冗長な規格もあり、相反する規格もあること。
- 最終製品の種類によって異なるさまざまな業界規格。
- 人の安全性を確保するための IEC (国際電気標準会議)、Underwriters Laboratories (UL)、ドイツ工業規格 (DIN)、ドイツ電気技術者協会 (VDE) からの安全絶縁の事例と、適切な動作を維持するための機能絶縁の事例。
- その他の考慮事項である、使用事例の高度、汚染度、IC 材料グループ、PCB のコンフォーマル コーティング、PCB の切り欠き、定期的な過渡テストなど。

このホワイト ペーパーでは、専門用語をその物理的意味と一緒に紹介し、沿面距離と空間距離との関係とそれらに及ぼす影響について説明します。その後で、構造化された方法論を使用して、適切な沿面距離と空間距離を決定するためのステップバイステップのガイドラインとフローチャートを提示します。

定義

沿面距離と空間距離

図 1 に示すように、沿面距離とは、2 つの導電性部分間の固体絶縁材の表面に沿った最短距離のことです。この距離は、汚染度、材料グループ、動作電圧 (絶縁材料がさらされる可能性のある 2 乗平均平方根 (RMS) 電圧の最高値) に応じて決められます。絶縁体のフラッシュオーバーや破壊が発生しないように設定されます。動作電圧の他に、沿面距離に最も影響を及ぼす要因としては、汚染、湿度、結露があります。

図 2 に示すように、空間距離とは、2 つの導電性部分間の空間の最短距離のことです。この距離は、必要な過渡過電圧時に、空気のイオン化やアーク放電を防止するために決められます。空間距離にとって最も重要な要素は、気圧 (高度) と汚染です。高度が 2,000m を超える場合の乗算係数がありますが、これについては **沿面距離、空間距離、高電圧 PCB 間隔の要求事項を決定するための手法** で説明します。

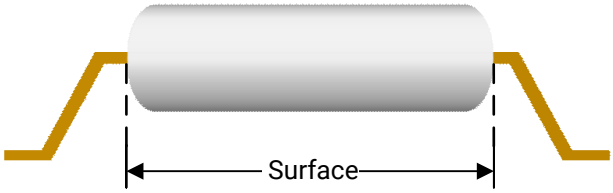


***図 1.** 沿面距離*

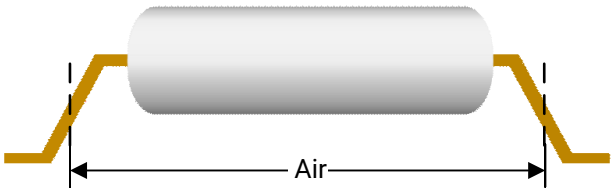


***図 2.** 空間距離*

沿面距離は長時間の定常状態の動作電圧に対応し、空間距離は数ミリ秒以下の短時間の過渡電圧に対応します。この 2 つの間に物理的な関連はありませんが、沿面距離が空間距離より小さくなることはありません。サイズとコストのトレードオフを考慮しながら、可能な限り沿面距離と空間距離の両方を最大化することが重要です。

また、図 3 に示すように、コーナー ピンがパッケージ端に近い場合、最短の沿面距離は上部や下部ではなく、側面になる可能性があることにも注意してください。

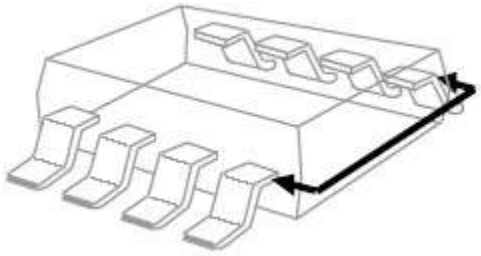


図 3. 最短の沿面距離が上部ではなく側面にある例

また、沿面距離と空間距離が同じになることもあります。たとえば、図 4 では、UCC21551-Q1 デュアル チャネル絶縁型ゲート ドライバの中間のピンを取り外すことで、沿面距離と空間距離が広がります。

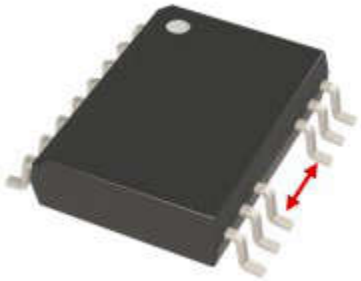


図 4. 沿面距離と空間距離が同じ場合の機能絶縁の例

材料グループおよび比較トラッキング指数

比較トラッキング指数 (CTI) は、電気的な故障が発生する電圧に基づいて絶縁材料を分類しています。CTI 定格は、0.1% の塩化アンモニウムで汚染された水滴 50 滴がついた材料に電圧を印加するテストによって決定されます。CTI 定格は、0.5A 未満のトラッキング電流が流れるこのテスト中に材料が耐えることができる最大電圧です [1]。表 1 に、CTI に基づく絶縁材料のカテゴリを示します。これらの材料グループは、**沿面距離、空間距離、高電圧 PCB 間隔の要求事項を決定するための手法** で説明するように、特定の絶縁要求事項に必要な沿面距離を決定するのに役立ちます。

材料グループ	CTI 範囲 (V_{RMS})
I	600 ≤ CTI
II	400 ≤ CTI < 600
IIIa	175 ≤ CTI < 400
IIIb	100 ≤ CTI < 175 または指定なしの場合

表 1. CTI に基づく材料グループ

PCB の製造に使用されるほとんどの FR4 材料は、材料グループ IIIa に分類されます。テキサス・インスツルメンツの絶縁製品はすべて、必要とされるパッケージ・サイズと PCB フットプリントを抑えるために、材料グループ I となっています。

汚染度

必要な沿面距離と空間距離を決定するために次に重要なパラメータは、汚染度です。汚染度の環境は、4 つのカテゴリに分類されます [2]。

- 汚染度 1 :汚染なし、または乾燥した非導電性の汚染のみがあります。このようなシステムは、ほこりや湿気を排除するために密閉されていたり、部品が湿度や温度に関連した結露の影響を受けないように PCB にはコンフォーマル コーティングが施されています。
- 汚染度 2 :結露が時々発生することによって導電性が一時的に発生します。汚染度 2 に分類される環境の一般的な例として、ラボ、オフィス、およびサーバー、通信機器、ワイヤレス インフラ用エンクロージャなどがあります。
- 汚染度 3 :環境は導電性の汚染、または予想される結露によって導電性になる可能性のある非導電性の汚染を受けています。一般的な例として、産業用アプリケーション、農業用機器、暖房設備のない工場の作業エリアなどがあります。
- 汚染度 4 :導電性のほこり、雨、またはその他の湿気のある条件によって、導電性が継続的に発生します。屋外アプリケーションの場合に一般的です。

過渡過電圧カテゴリ

必要な空間距離を決定する際に使用されるもう一つの要素には、過渡過電圧カテゴリがあります。これは、商用電源電圧との接続場所に基づいて機器を分類するものです。この電圧レベルは数学的に分類されるのではなく、機器の設置場所に基づくリスクに基づいた要因によって決められます。

図 5 は住宅用建物の図で、異なる過渡過電圧カテゴリがラベル付けされた場所の例を示しています。4 つのカテゴリは以下のとおりです [3]。

- カテゴリ I :この最も低いカテゴリは、過電圧過渡を制限する対策が講じられた方法で接続されている回路用です。例として、降圧トランス経由で商用電源電圧に接続された $24V_{AC}$ のサーモスタットやスプリンクラー システムなどの機器などがあります。
- カテゴリ II :このカテゴリは、固定設置された場所から電源供給される機器用です。例として、カテゴリ III から 10m 離れたコンセントに接続された機器などがあります。
- カテゴリ III :このカテゴリは、特別な要求事項の対象となる固定された機器用です。例として、ヒューズ パネル内のスイッチ、エアコン、AC 商用電源にハードワイヤ接続された産業機器など、恒久的に接続された機器などがあります。
- カテゴリ IV :このカテゴリは、設置元で使用される機器、つまり商用電源電圧に直接接続されている機器用です。例として、電気メーター、配電パネル、公共施設の変圧器などがあります。

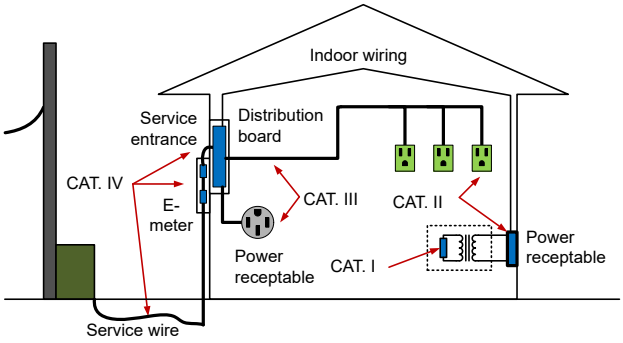


***図 5.** 過渡過電圧カテゴリの例*

沿面距離、空間距離、PCB 間隔に関する規格

沿面距離と空間距離に関連する規格は数多くあります。補完的な規格もあれば、相反する規格もあり、冗長な規格も多くあります。式やルックアップ テーブルを使用して必要な沿面距離と空間距離を求めるだけの規格はありません。

このセクションでは、さまざまな規格を紹介し、**沿面距離、空間距離、高電圧 PCB 間隔の要求事項を決定するための手法** でそれらを使用するタイミングと方法を説明します。その前に、これらの規格を、絶縁システムにおけるユーザーの安全に関連するものと、PCB に関連するものの 2 つのカテゴリに分類しましょう。

絶縁システムにおけるユーザーの安全に関する基本的な規格は IEC 60664-1 であり、これは最大 $1.5kV_{DC}$ または $1kV_{AC}$ のシステムに適用されます。IEC 60664-1 には、沿面距離、空間距離、耐電性テストが含まれています。IEC 60664-1 をベースとしながらも、より具体的なガイドラインが追加されている、特定の最終製品に特化した規格が他にもいくつかあります。たとえば、通信、サーバー、オーディオ / ビデオ、クラウド コンピューティング向けの IEC 62368-1 と IEC 60950-1 [4]、[5]、モーター ドライバ向けの IEC 61800-5 [6]、ソーラー向けの IEC 62109-1 [7] があります。

PCB 間隔に関する規格は、適切な動作または機能動作のみに対応しており、ユーザーの安全については対応していません。主たる規格は米国電子回路協会 (IPC) -2221B で、汎用的な要求事項を網羅する一般的な規格です [8]。PCB 間隔に対応しているもう一つの汎用規格は IPC-9592B であり、IPC-2221B をベースにしていますが、コンピュータ業界や通信業界向けの具体的なガイドラインが追加されています [9]。IPC-9592B は IPC-2221B に比べて少し厳しい規格です。さらに、IEC 62368-1 は、通信、サーバー、オーディオ / ビデオ、クラウド コンピューティング用のコーティングされた PCB とコーティングされていない PCB の両方に関するガイドラインも規定しています。

絶縁規格

アイソレータの絶縁規格には、絶縁バリアが電気的、機械的、熱的ストレスや環境の影響に耐える能力を検証するさまざまなものがあります。これには、欧州連合の DIN VDE V 0884-11、米国の UL 1577、中国の中国品質認定センター (CQC) GB4943.1 が含まれます[10 - 12]。これらの認証規格で規定されているパラメータは、絶縁バリアについて記載したものであり、沿面距離や空間距離に直接関係するものではありません。沿面距離と空間距離にとって重要なのは、基本絶縁、強化絶縁、機能絶縁などの各グレードです。

絶縁のグレードとガイドライン

絶縁のグレードには次の 5 つのタイプがあります [13]。

- 機能絶縁は、グランド バウンス、高い動作電圧、2 次側回路間 (1 次側商用電源ではない) の過渡などが存在する状況で、回路を適切に動作させることを目的としています。機能絶縁は、ユーザーの安全とは無関係です。
- 基本絶縁とは、正常な動作条件と異常な動作条件の両方で、感電からユーザーを保護する単一レベルの絶縁です。
- 付加絶縁とは、単一障害条件に対処するための追加の絶縁保護層です。第 1 層の絶縁に障害が発生した場合、付加絶縁を使用すると、感電からユーザーを保護できます。
- 二重絶縁は、基本絶縁と付加絶縁を組み合わせたものです。
- 強化絶縁は二重絶縁と同じ定格と保護を提供しますが、単層の絶縁材で実施されます。

実際に最も一般的であり、**絶縁規格** で紹介した絶縁規格が対応しているのは、基本絶縁と強化絶縁の 2 種類です。必要な沿面距離と空間距離は、基本絶縁と強化絶縁のどちらが設計において必要かによって異なります。

IEC 60664-1、IEC 62368-1、IEC 60950-1 はいずれも、アプリケーションで基本絶縁と強化絶縁のどちらが必要かを決定するガイドラインを提供しています。これらのガイドラインでは、「一般の人」と「ユーザー」という用語は同じ意味で使用されています。また、これらの規格は異なる電圧レベルを分類するために異なる用語を使用していますが、それぞれの電圧に応じて 3 つのエネルギー源クラスに用語を簡略化することが可能です。

- エネルギー源クラス 1 (ES1) は、最大 60V の電圧を持つ回路で構成されています。これらの回路は触れても安全で、ユーザーからの絶縁は不要です。IEC 60950-1 では、この電圧クラスを安全特別低電圧 (SELV) と定義しています。このクラスには、IEC 60950-1 で定義されている電気通信ネットワークの電圧クラス 1 (TNV-1) の回路が含まれます。
- ES2 には、60V～120V の電圧範囲の回路が含まれます。これらの回路では、回路とユーザーの間に基本な絶縁が必要です。IEC 60950-1 で定義されている TNV-2 と TNV-3 クラスに属する回路が含まれます。
- ES3 には、電圧が 120V を上回る回路が含まれています。これらの電圧は危険であるとみなされており、回路とユーザーの間に強化絶縁が必要です。

IEC 60950-1 の図 2H には、異なる回路間の必要な絶縁レベルを決定するために、とてもわかりやすいガイドが示されています。図は、1 次側回路、接地された / 非接地の SELV、接地された / 非接地の TNV-1、2、または 3、接地された / 非接地の危険な電圧間で、機能絶縁、基本絶縁、または強化絶縁が必要な場合を示しています。回路をアース接続すると、必要な絶縁レベルが低くなることがよくあります。**表 2** に、IEC 60950-1 の図 2H の概略と一般的な例を示します。

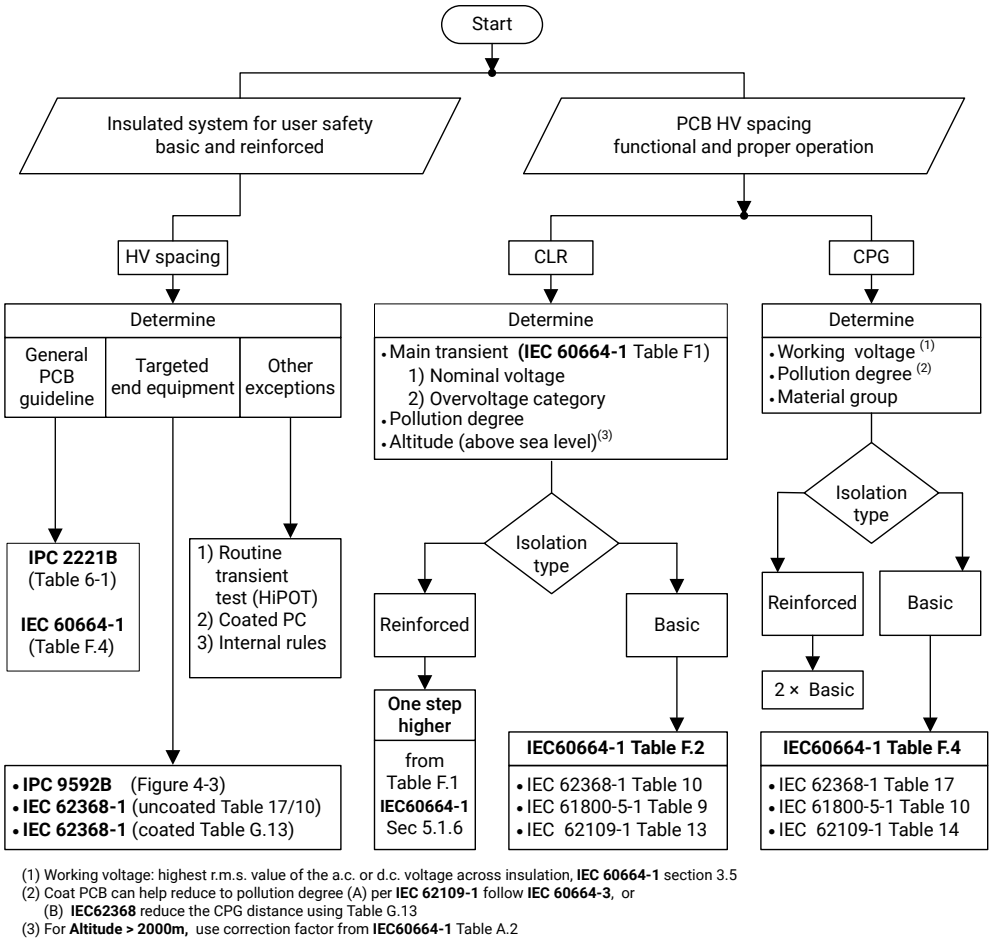
絶縁のグレード	分離された部品		例
機能	SELV	SELV	<60V ブリック モジュール
	強化された回路		
基本	1 次側、ES2、TNV-2、TNV-3、危険な電圧	接地された SELV	• >60V DC/DC • 12V または 48V 出力の AC/DC 整流器 • 400V オンボード チャージャ
	プライマリ	非接地の危険な電圧	
強化	一次側、危険な電圧	非接地の SELV	12V または 48V 出力の AC/DC 整流器
	ES2、TNV-2、TNV-3		>60V DC/DC

表 2. *一般的なアプリケーションに必要な絶縁のグレードの例*

沿面距離、空間距離、高電圧 PCB 間隔の要求事項を決定するための手法

フローチャート

ここまで、いくつかの定義、分類、評価、規格、複雑なガイドラインを紹介してきました。ここでは、開発プロセスの簡素化と迅速化のために、これらすべてを 1 つのフローチャート (**図 6** を参照) にまとめて、アプリケーションに適した沿面距離と空間距離を決定する手順をステップごとに説明します。



(1) Working voltage: highest r.m.s. value of the a.c. or d.c. voltage across insulation, **IEC 60664-1** section 3.5
(2) Coat PCB can help reduce to pollution degree (A) per **IEC 62109-1** follow **IEC 60664-3**, or
(B) **IEC62368** reduce the CPG distance using Table G.13
(3) For **Altitude > 2000m,** use correction factor from **IEC60664-1** Table A.2

図 6. *アプリケーションに適した沿面距離と空間距離を決定するフローチャート*

このフローチャートには、ユーザーの安全を確保するための絶縁システムに関するものと、PCB 間隔に関するものの 2 つの主要なパスがあります。ユーザーの安全を確保するためのパスには、沿面距離を決定するサブパスと、空間距離を決定するサブパスがあります。

このフローチャートを使用して、ユーザーの安全確保のための沿面距離と空間距離、および PCB の高電圧間隔を決定する方法を説明します。

ユーザーの安全を確保するための絶縁システムにおける沿面距離の決定

沿面距離の場合、アプリケーションの動作電圧、絶縁材料の材料グループ、および環境の汚染度を知っている必要があります。次のステップでは、IEC 60950-1 の図 2H を使用して、基本絶縁と強化絶縁のどちらが必要なのかを決定します。基本絶縁が必要な場合、次のステップで決定される沿面距離の値を使用します。強化絶縁が必要な場合、次のステップで決定される沿面距離を 2 倍にします。

最終製品に基づいて、必要な沿面距離を調べます。汎用最終製品の場合は、IEC 60664-1 の表 F.4 を使用してください。オーディオ、ビデオ、情報通信機器の場合は、IEC 62368-1 の表 17 を使用してください。モータードライブの場合、IEC 61800-5-1 の表 10 を使用してください。ソーラー アプリケーションの場合、IEC 62109-1 の表 14 を使用してください。

最終製品に基づいて、必要な沿面距離を調べます。

- 汎用最終製品の場合、IEC 60664-1 の表 F.4 を使用してください。
- オーディオ、ビデオ、情報通信機器の場合は、IEC 62368-1 の表 17 を使用してください。

- モータードライブの場合、IEC 61800-5-1 の表 10 を使用してください。
- ソーラー アプリケーションの場合、IEC 62109-1 の表 14 を使用してください。

表 3 は、IEC 60664-1 の表 F.4 の一部を簡略化して、一般的な動作電圧と汚染度を示したものです。汚染度 1 の場合、汚染はないので、材料グループは問題ではないことがわかります。汚染度 2 と材料グループ I の場合、動作電圧温度 400V を使用するアプリケーションでは、基本絶縁の場合に沿面距離 2mm、強化絶縁の場合に (2 倍の) 沿面距離 4mm を必要とします。汚染度 2 と材料グループ III の場合、動作電圧 400V を使用するアプリケーションでは、基本絶縁の場合は沿面距離 4mm、強化絶縁の場合は (2 倍の) 沿面距離 8mm を必要とします。

V_{RMS}	トラッキングによって発生する障害を防止するための沿面距離 (mm)			
	汚染度 1	汚染度 2		
	すべての材質グループ	材料グループ		
		I	II	III
63	0.2	0.63	0.9	1.25
400	1.0	2.0	2.8	4.0
800	2.4	4.0	5.6	8.0
1,000	3.2	5.0	7.1	10.0

***表 3.** IEC 60664-1 表 F.4 の一部 (一般的な動作電圧、汚染度、材料グループを示す)*

ユーザーの安全を確保するための絶縁システムにおける空間距離の決定

空間距離の場合、アプリケーションに必要な過渡電圧を知っておく必要があります。これは、電源の公称電圧と過渡過電圧カテゴリに依存するものです。また、環境の汚染度、および想定される動作高度 (海抜メートル) も把握しておく必要があります。

電源の公称電圧と過渡過電圧カテゴリを使用して、IEC 60664-1 の表 F.1 を参照し、必要なインパルス電圧定格を決定してください。基本絶縁が必要な場合は、空間距離を決定するためにこの電圧を使用する必要があります。アプリケーションがオーディオ、ビデオ、情報通信機器向けの場合は、IEC 62368-1 を使用する必要があります。この規格では、これらの最終製品における基本絶縁と強化絶縁の両方について適切な空間距離が記載されています。その他のタイプの最終製品については、基本絶縁の値のみを示す表を使用することになります。したがって、強化絶縁の場合、IEC 60664-1 の表 F.1 において、当該アプリケーションから 1 つ上のインパルス電圧を使用する必要があります。IEC 60664-1 のセクション 5.1.6 では、このプロセスについてより詳細に説明しています。

表 4 は、IEC 60664-1 の表 F.1 の一部を簡略化して、一般的な動作電圧を示したものです。この表を使用して、必要なインパルス電圧定格を決定します。たとえば、過渡過電圧カテゴリ II に設置された 230V のライン-中性線間のアプリケーションでは、基本絶縁には 2,500V のインパルス電圧が必要となり、IEC 62368-1 以外の規格を使用する場合、強化絶縁には 4,000V が必要となります。

ライン-中性線間の電圧 (V_{RMS})	電源過渡電圧 / 定格インパルス電圧 (V_{PEAK})			
	過電圧カテゴリ			
	I	II	III	IV
≤50	330	500	800	1,500
≤150 (例：米国では 120V)	800	1,500	2,500	4,000
≤300 (例：欧州連合、中国では 230V)	1,500	2,500	4,000	6,000
≤600 (例：産業用モーター、船舶用電源)	2,500	4,000	6,000	8,000

***表 4.** IEC 60664-1 表 F.1 の一部 (一般的な動作電圧を示す)*

システムによっては、AC 電源の過渡電圧にさらされない場合もあります。このような場合は、IEC 60664-1 のセクション 5.3.3.2.3 に記載されているように、公称ライン-中性線間電圧に 1,200V を加えることで、必要なインパルス電圧定格を計算できます。

必要なインパルス電圧がわかったところで、当該の最終製品のタイプに基づいた適切な表から、海抜 2,000m までのアプリケーションに必要な空間距離を確認します。汎用最終製品の場合、IEC 60664-1 の表 F.2 を使用してください。オーディオ、ビデオ、情報通信機器の場合は、IEC 62368-1 の表 10 を使用してください。モータードライブの場合、IEC 61800-5 の表 9 を使用してください。ソーラー アプリケーションの場合、IEC 62109-1 の表 13 を使用してください。

表 5 は、IEC 60664-1 の表 F.2 の一部を簡略化して、一般的なインパルス電圧定格を示したものです。比較のために、括弧内には IEC 62368-1 の表 10 の値を含めています。オーディオ、ビデオ、情報通信の各アプリケーションで、要件が少し厳しくなっていることがわかります。

必要なインパルス耐性電圧 (kV)	最小空間距離 (mm)		
	汚染度		
	1	2	3
0.5	0.04	0.2	0.8
1.5	0.5 (0.76)		0.8
2.5	1.5 (1.8)		
4.0	3.0 (3.8)		
6.0	5.5 (7.9)		

表 5. *IEC 60664-1 表 F.2 の一部 (一般的なインパルス電圧および汚染度を示す)括弧内の数値は、IEC 62368-1 の表 10 の空間距離です。*

最後に、動作高度が 2,000m を超える場合は、IEC 60664-1 の表 A.2 を使用して、空間距離に適した乗算係数を決定してください。

高電圧 PCB 間隔の決定

高電圧 PCB 間隔については、最終製品に基づいて必要な間隔を調べる必要があります。それ以外にも、考慮しなければならない例外があります。これらの例外には、必要な空間距離を満たすことができない場合の PCB コンフォーマル コーティングや、高電圧に対する絶縁耐力を確保するために製造時に定期的に行われる過渡高電位テスト、または適用される可能性があるその他の社内規則が含まれます。

IEC 60664-1 の表 F.4 (沿面距離の決定に使用するのと同じ表) と IPC-2221B の表 6-1 に、一般的な PCB ガイドラインを示します。IEC 60664-1 の表 F.4 の最初の 2 列は、「プリント配線材料」、つまり PCB パターンについて示しています。これらの値は、コンフォーマル コーティングされていない外部 PCB 層の導体に関する IPC-2221B の表 6-1 の値に非常に近くなっています。IPC-2221B には、内部 PCB 層、コンフォーマル コーティングの有無による外部 PCB 層、および外部コンポーネント アセンブリの空間距離の要求事項が含まれています。IPC-9592B には、コンピュータおよび通信機器の最終製品に関する具体的なガイドラインが記載されています。これらの空間距離のガイドラインは、より一般的な IPC-2221B よりも、より保守的な (厳しい) ものになっています。ここでは、導体が必要な空間距離を満たしていない場合は、コンフォーマル コーティングを使用する必要があると記載されています。

図 7 は、必要な空間距離とピーク電圧との関係を規格別に示したものです：IEC 60664-1、コーティングされていない外層向けの IPC-2221B、コーティングされている外層向けの IPC-2221B、内層向けの IPC-2221B、および IPC-9592B。内部 PCB 層は外層に比べてはるかに狭い間隔しか必要とせず、コンフォーマル コーティングされている外層は、コンフォーマル コーティングされていない外層に比べて狭い間隔しか必要としません。たとえば、アプリケーションのピーク電圧が 400V の場合、IPC-2221B に従えば、内部 PCB 層には 0.25mm の空間距離しか必要ありません。コンフォーマル コーティングされていない外層の場合、空間距離は規格に応じて 2mm～2.6mm の範囲になります。汎用的な規格では、IEC 60664-1 が 2mm、IPC-2221B が 2.5mm を要求しています。この場合、より厳しい 2.5mm にすることをお勧めします。コンピュータや通信アプリケーションの場合、IPC-9592B に従えば空間距離は 2.6mm でなければなりません。これらの空間距離を満たすことができない場合は、コンフォーマル コーティングを使用する必要があります。コンフォーマル コーティングを使用する場合、外層に必要な空間距離はわずか 0.8mm になります。

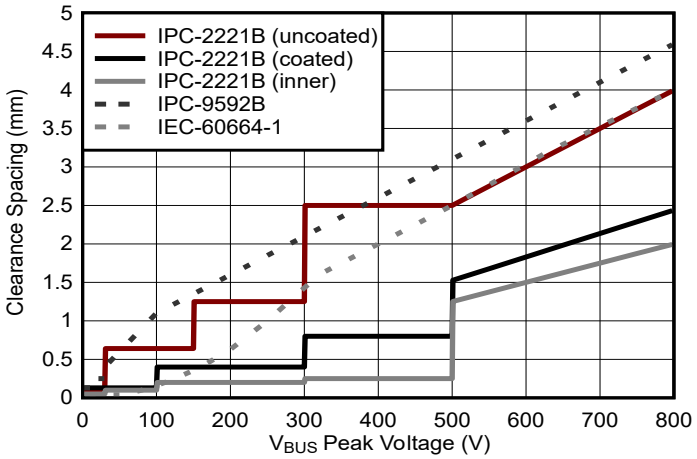


図 7. *各規格で規定されている高電圧 PCB 空間距離の要求事項*

フローチャートの使用例：通信機器向け AC/DC フロント エンド

フローチャートを見ながら、いくつかの規格の関連表の使用方法を説明しましたが、ここでは、**図 8** に示すような、通信機器向け AC/DC フロント エンドの例を見てみましょう。このアプリケーションでは、85～265V_{AC} のユニバーサル入力と、40～60V_{DC} の出力があり、地面の接地に対してはフローティング状態です。

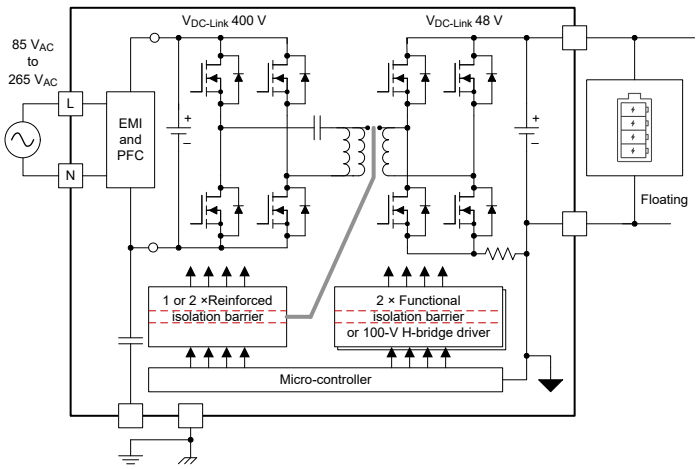


図 8. 通信機器向け AC/DC フロント エンドの例

最初のステップでは、必要な沿面距離を決定します。これには、動作電圧、汚染度、材料グループに関する知識が必要になります。このコンバータの最高動作電圧は 400V で、これは DC リンク電圧に相当します。この電源は通信機器のエンクロージャ内にあるため、汚染度は 2 です。

この沿面距離は、システムで使用される個々の部品に固有であるため、3 つの材料グループすべてについて必要な沿面距離を調べることが重要です。たとえば、テキサス・インスツルメンツの絶縁型ゲート ドライバは材料グループ I の絶縁材を使用し、他のベンダのフォトカプラは材料グループ II の絶縁材を使用し、PCB FR4 材料は材料グループ IIIa の絶縁材を使用することがあります。目標は、海抜 5,000m までの高さで動作する電源を設計することです。

次のステップでは、強化絶縁と基本絶縁のどちらが必要なのかを決定します。入力は 1 次側商用電源で、出力は IEC 60950-1 に従って接地されていない SELV です。1 次側商用電源から接地されていない SELV まで、IEC 60950-1 の図 2H には強化絶縁が必要であると記載されています。出力グランドからアース接地への接続は基本絶縁のみを必要とするため、沿面距離と空間距離の要求事項が小さくなりますので、注意してください。ただし、この電源の出力はアース接地されていないため、強化絶縁の規則が適用されます。IEC 62368-1 の表 17 には必要な沿面距離が示されています。このアプリケーションでは強化絶縁が必要なため、沿面距離は 2 倍になります。表 17 には、材料グループ I の場合は 4mm、材料グループ II の場合は 5.6mm、材料グループ III の場合は 8mm の沿面距離が必要であることが示されています。これには、強化絶縁のための倍加係数も含まれます。

ここで、必要な空間距離を決定していきます。汚染度は 2 で、設計で求められる高度が 5,000m であることがわかっているため、次のステップは、必要な商用電源の過渡インパルス電圧を決定することです。商用電源の公称ライン-中性線間電圧は最大 265V で、このパワー コンバータがコンセントに接続されるため、過渡過電圧カテゴリは II です。IEC 60664-1 の表 F.1 から、過電圧カテゴリ II の定格インパルス電圧が 2.5kV であることがわかります。汎用的な IEC 60664-1 の表 F.2 の空間距離の規則を使用する場合、このアプリケーションが強化絶縁用であるため、次に高い値である 4kV を使用する必要があります。ただし、これは通信アプリケーション向けであるため、基本絶縁と強化絶縁の両方の値を示している IEC 62368-1 の表 10 を使用します。この表から、2.5kV の定格インパルス電圧の場合、強化絶縁を実現するには 3.6mm の空間距離が必要であることがわかります。これは、IEC 60664-1 の表 F.2 で 4kV を使用した場合の空間距離 3mm よりも、より保守的 (厳しい) です。

次に、IEC 60664-1 の表 A.2 に示されている高度補正係数を適用する必要があります。5000m の場合、補正係数は 1.48 です。このアプリケーションに必要な空間距離は 5.33mm (3.6mm × 1.48) になります。

表 6 は、沿面距離と空間距離、それらを決定するために必要なパラメータ、および規格の関連表への参照についてまとめたものです。

パラメータ	値			ソース
電源公称電圧	235V_{AC}			特定用途向け
最大動作電圧	400V_{DC}			
高度	5,000m			
過渡過電圧カテゴリ	II			
汚染度	2			
絶縁グレード	強化			IEC 60950-1 表 2H
材料グループ	I	II	III	部品のデータシート
沿面距離	4mm (2mm × 2)	5.6mm (2.8mm × 2)	8mm (4 mm × 2)	IEC 62368-1 表 17
定格インパルス電圧	2.5 kV			IEC 60664-1 表 F.1
高度補正係数	1.48			IEC 60664-1 表 A.2
空間距離	5.33mm (3.6mm × 1.48)			IEC 62368-1 表 10

表 6. *沿面距離および空間距離の要求事項の概要 (例:通信機器向けの AC/DC フロント エンド)*

必要な沿面距離と空間距離を確保できない場合の例外

空間距離の要求事項を満たすことができない場合に、PCB をコンフォーマル コーティングする方法について説明してきました。さらに、沿面距離を満たすことができない場合は PCB の切り欠きを使用し、沿面距離、空間距離、またはその両方を満たすことができず、機能絶縁のみが必要な場合は定期的な過渡テストを実行することができます。

PCB 上で必要とされる沿面距離を満たすことができない場合もあります。これは、IC 絶縁体が材料グループ I で、PCB が材料グループ IIIa の場合に特に当てはまります。たとえば、通信機器向け AC/DC フロント エンドの例では、材料グループ I で 4mm、材料グループ IIIa で 8mm の沿面距離が必要でした。沿面距離 4mm のパッケージによって、PCB 上で 8mm の間隔を使用できない場合があるかもしれません。この場合、PCB に溝をつけて沿面距離を長くすることが可能です。こうすることは空間距離には影響しませんが、沿面距離は絶縁材の表面に沿った最短距離の測定値であるため、沿面距離を長くすることができます。IEC 60664-1 のセクション 6.2 には、沿面距離を長くするためのガイドラインが示されています。スロットの幅が X の場合、汚染度に基づいて最小値 = X が決まります。**図 9** は切り欠きがある PCB の断面図で、**表 7** には、汚染度に基づいてスロットが必要とする最小幅を示しています。

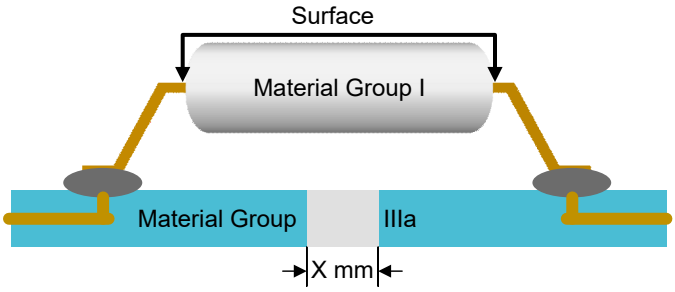


図 9. *PCB の沿面距離を長くするためにスロットが設けられた PCB の断面図*

汚染度	最小寸法
1	0.25mm
2	1.0mm
3	1.5mm

表 7. *沿面距離を長くするために PCB に設けられたスロットの最小幅*

機能絶縁のみが必要な場合は、必要な沿面距離と空間距離を満たすことができないときには、定期的な過渡 (高電位) テストを生産時に使用することができます。このテストでは、意図的に絶縁した 2 つの導体の間に高電圧を印加し、その結果生じるリーク電流を測定します。リーク電流が特定のスレッショルドを超えると、デバイスに障害が発生します。高電位テスト時に印加される電圧は、一般に、動作電圧の 2 倍に 1,000V を加えたものです。

たとえば、最大動作電圧 265V_{AC} のアプリケーションは、2 × 265 + 1,000 = 1,530V でテストされます。このため、一般的なテスト電圧は 1.5kV になります。いくつかの規格では、沿面距離と空間距離を満たすことができない場合の高電位テストのガイドラインが規定されています:IEC 60664-1 のセクション 5.2.2.1 および 5.1.3.3、IEC 60950-1 のセクション 5.3.4、IEC 62368-1 のセクション B.4.4。

結論

沿面距離と空間距離に対応している規格は多く存在しており、それらを使用するために設計者が理解しなければならない専門用語も多く存在します。このホワイト ペーパーに掲載しているフローチャートと手法を使用すれば、沿面距離、空間距離、高電圧間隔についての理解が深まり、開発プロセスの迅速化に役立つはずです。この知識によって、安全設計ガイドラインを維持しながら、電力密度を高めることができます。

参考資料

1. **『固体絶縁材料の保証及び比較トラッキング指数の測定方法』**IEC 60112。IEC：スイス、ジュネーブ、2020 年 10 月 27 日。
2. **『低圧電源系統内機器の絶縁協調 – 第 1 部：原則，要求事項及び試験』**IEC 60664-1。IEC：スイス、ジュネーブ、2020 年 5 月 26 日。
3. 低圧電気設備。IEC 60364。IEC：スイス、ジュネーブ。
4. **『オーディオ / ビデオ、情報及び通信技術機器 – 第 1 部：安全性要求事項』。**IEC 62368-1。IEC：スイス、ジュネーブ、2023 年 5 月 26 日。
5. **『情報技術機器 – 安全性 – 第 1 部：一般要求事項』。**IEC 60950-1。IEC：スイス、ジュネーブ、2013 年 5 月 28 日。
6. **『可変速電力ドライブシステム (PDS) – 第 5-1 部：安全要求事項 – 電気，熱及びエネルギー』**IEC 61800-5。IEC：スイス、ジュネーブ、2022 年 8 月 31 日。
7. **『太陽光発電システムで使用する電力コンバータの安全性 – 第 1 部：一般要求事項』。**IEC 62109-1。IEC：スイス、ジュネーブ、2010 年 4 月 28 日。
8. **『プリント基板設計に関する共通基準』。**IPC-2221B。IPC：イリノイ州バノックバーン、2012 年 11 月。
9. **『コンピュータおよび通信産業向け電力変換器に関する要求事項』。**IPC-9592、リビジョン B。IPC：イリノイ州バノックバーン、2013 年 1 月 14 日。
10. 『半導体デバイス – 第 11 部：基本絶縁および強化絶縁用の磁気カプラと容量カプラ』。DIN VDE V 0884-11。VDE：ドイツ、フランクフルト、2017 年 1 月。
11. **『光学アイソレータ』** UL 1577。UL：イリノイ州ノースブルック、2014 年 4 月 25 日。
12. 『オーディオ / ビデオ、情報及び通信技術機器 – 第 1 部：安全性要求事項』。CQC GB4943.1。中華人民共和国、国家認証認定管理委員会：中国、北京、2022 年 8 月 1 日。
13. **『絶縁関連用語』**テキサス・インスツルメンツ文献番号 SLLA353A、2017 年 9 月。

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、または ti.com やかかる TI 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。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。

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、TI 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