

Revision: 04

Issue date: 2024-03-27

Prepared by: Rainer Weiss

Approved by: Dr. Ulrich Nicolai

Keyword: Clearance, Coordination, Creepage, Drive, Insulation, Isolation, Module, Photovoltaic, Solar, Solid, Standard

絶縁協調

1. 概要	1
2. 絶縁の種類	2
2.1 機能絶縁	2
2.2 基礎絶縁	2
2.3 保護分離	2
3. 絶縁の実現	3
3.1 空間距離	3
3.2 沿面距離	4
3.3 固体絶縁	5
4. 規格	5
4.1 欧州および国際規格	5
4.2 UL 規格	6
5. セミクロンダンフォスモジュール	8
6. ACドライブの例	8
6.1 仕様	8
6.2 空間距離	9
6.3 沿面距離	10
6.4 固体絶縁	13
6.5 ACドライブの概要	14
7. 太陽光発電コンバータの例	14
7.1 仕様	14
7.2 空間距離	15
7.3 沿面距離	18
7.4 固体絶縁	22
7.5 太陽光発電コンバータの概要	23

1. 概要

電気絶縁体は、電圧の影響下で電流を伝導しにくくする材料です。完全な絶縁体は存在しません。印加電圧が臨界レベルを超えると、絶縁体の一部が導電性を持つようになります。絶縁体は、すべての電気機器で、電流が流れないように電気導体を分離する為に使用されます。絶縁体の性能は、アプリケーション環境に於いて長期間電気ストレスに耐えられる程、優れている必要があります。絶縁体については長年にわたり多くの経験が蓄積されており、いくつかの規格に文書化されています。絶縁協調に関する規則は、アプリケーションから与えられた電気絶縁の電圧ストレス要件を、標準の経験に基づく必要な絶縁耐性能力と一致させます。このアプリケーションノートは、パワーエレクトロニクスに関する経験と、絶縁協調の関連規格に関する経験を持つ技術者およびエンジニア向けに書かれています。2つの例は、モータドライブと3レベルテクノロジーを備えた太陽光発電コンバータです。このノート

は、絶縁規格全般を理解する為のガイドですが、ドライブ規格と太陽光発電コンバータ規格にも重点を置いています。また、セмикロندانフォスが自社製品の絶縁協調をどのように行っているかも示しています。このアプリケーションノートは、関連するアプリケーション標準そのものを読むことに代わるものではありません。

英語の「絶縁」と「隔離」は混同されることがよくあります。絶縁とは、電気部品を環境から保護する為に、電気部品を包んだり覆ったりする材料を指します。絶縁とは、電気要素を他の電気部品から分離して独立させることを意味します。このアプリケーションノートでは、電気要素を覆う空気などの材料について言及している為、絶縁という用語が使用されています。

2. 絶縁の種類

絶縁協調は、目的に応じて 3 種類の絶縁体間で異なり、階層的に等級分けされた要件を満たす必要があります。

2.1 機能絶縁

機能絶縁は回路内の電位を分離し、安全性に関連する側面ではなく、純粋に機能的な側面を考慮します。

コンバータなどのパワーエレクトロニクス装置では、これは入力端子と出力端子の間、またはモジュールレベルでは AC、DC、ブレーキチョップなどの電力端子とゲートやエミッタなどの IGBT の制御端子の間にあります。

2.2 基礎絶縁

基礎絶縁は、グリッドから供給される回路を接地された露出部分から分離する為、安全にとって不可欠です。絶縁破壊は、露出部分が接地されている為、自動的に生命の危険につながるわけではありません。

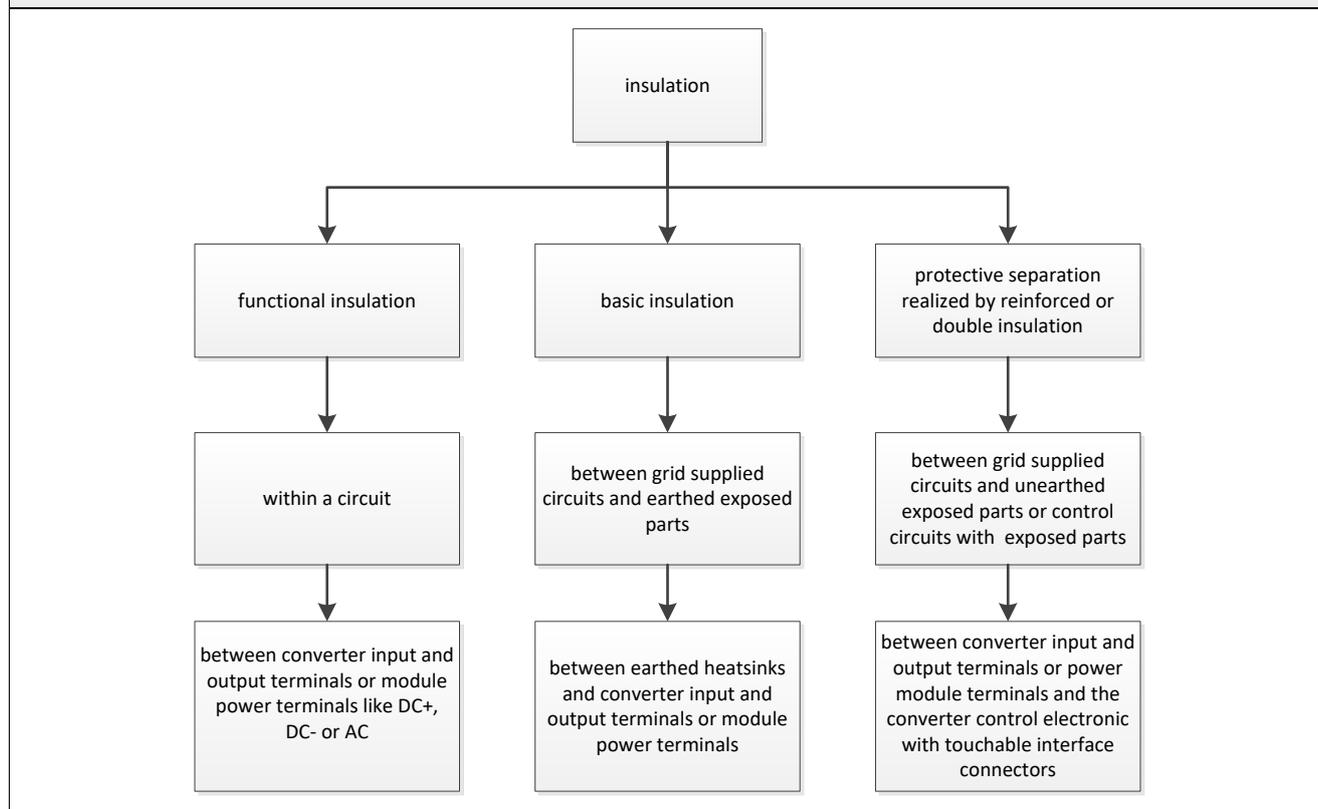
これは、一方では接地されたヒートシンク、ハウジング、またはモジュールのベースプレートと、他方ではコンバータの入力端子と出力端子、またはモジュールの電力端子との間にあります。

2.3 保護分離

強化絶縁または二重(基本絶縁の 2 倍)絶縁によって実現される保護分離は、一方ではグリッド供給回路を接地されていない露出部分から分離し、他方では露出部品を持つ他の制御回路に直接接続されている場合は、制御回路から分離します。機器のユーザーに対しては、それ以上の保護は提供されません。この絶縁が破壊されると、接地されていない露出部分がグリッド電圧にシフトする可能性がある為、致命的となる可能性があります。これが、より厳しい要件を満たす必要がある理由です。

保護分離は、一方ではコンバータの入力端子と出力端子またはモジュールの電源端子と、他方では絶縁された内部制御回路またはセンサーとの間に行われます。これらのセンサーは電流、電圧、または温度用であり、その出力はコネクタのピンやタッチパネルなどの露出部分のある制御回路に接続される場合があります。パワーモジュールのドライバーボード上の露出部分のある電源回路と制御回路の間には、さらに保護分離が必要です。

図 1: 絶縁の種類



3. 絶縁の実現

絶縁は、空間絶縁、沿面絶縁、固体絶縁、またはこれら 3 つの組み合わせとして実装できます。

3.1 空間距離

導電部品間の空気空間を空間距離と呼びます。電圧が印加された場合、フラッシュオーバーが常に防止されるよう、この値を十分に大きくする必要があります。この決定要因は、存在する最大ピーク電圧と周囲の空気の絶縁強度です。ピーク電圧は、グリッドから通電される機器の過電圧カテゴリによって考慮されます。特別に保護された回路では、落雷が発生する可能性のある回路(=高カテゴリレベル)よりも、予想される電圧が低くなります(=低カテゴリレベル)。既存の 4 つのカテゴリは、すべての絶縁規格で説明が若干異なりますが、意味は同じです。

表 1: EN61800-5-1、4.3.6.1.3 に準拠した過電圧カテゴリ

過電圧カテゴリ (OVCAT)	内容
1	過渡過電圧を低レベルに抑える対策が、講じられた回路に接続された機器
2	固定設備に恒久的に接続されていない機器
3	固定設備に恒久的に接続された機器(主配電盤の下流、主配電盤を含む)
4	設備の起点(主配電盤の上流)に恒久的に接続された機器

設置高度は気圧の低下により、空気の絶縁強度に大きな影響を与えます。設置高度が海拔 2000 メートルを超える場合、必要な空間距離は EN60664-1、表 A2 に記載されている高度補正係数だけ拡大する必要があります。この規格では、表の線間の高度の補間を禁止も許可もしていません。補間は通常行われており、物理的にも意味があります。

表 2: EN60664-1、表 A2 に基づく高度補正係数		
高度 [m]	通常の気圧 [hPa]	空間距離の乗数
2000	800	1.00
3000	700	1.14
4000	620	1.29
5000	540	1.48
6000	470	1.70
7000	410	1.95

3.2 沿面距離

絶縁材料の表面が汚染されると、その表面を横切る導電経路が形成されることがあります。この導電部分の長さは、沿面距離、沿面トラック、または単に沿面と呼ばれます。汚れ、塩分、水、および印加電圧は、導電経路の必要な長さに影響を与えます。沿面距離の寸法は、汚染レベルと表面電流に対する使用材料の抵抗によって決まります。環境条件は 4 つの汚染度と関連します。

表 3: EN61800-5-1、4.3.6.1.2 に準拠した汚染度	
汚染度 (PD)	内容
1	汚染は発生しないか、乾燥した非導電性の汚染のみ発生します。汚染の影響はありません。
2	通常、非導電性の汚染のみが発生します。ただし、デバイスが動作していない時に、結露による一時的な導電性が発生する場合があります。EN50124-1 などの一部の規格では、動作中の結露による一時的な導電性も想定されています。
3	導電性汚染または乾燥した非導電性汚染が発生し、結露により導電性になりますが、これは予想どおりです。
4	汚染は、導電性のほこりや雨、雪などによって引き起こされる持続的な導電性を生み出します。

絶縁材料の抵抗は、比較トラック指数 (CTI) で表されます。これは、規定の試験設定で指定された漏れ電流が流れるまで、試験電圧を上げることで決定されます。材料の抵抗が大きい程、CTI 値が高くなり、沿面トラックが短くなります。絶縁材料は 5 つのグループに分類されます。

表 4: EN61800-5-1、4.3.6.5.2 に準拠した比較トラッキング指数(CTI)グループ

CTI グループ	CTI レベル	例
0		ガラスやセラミックなどの無機材料は、跡が残りません
1	≥600	PE-HD(ポリエチレン)や PTFE(ポリテトラフルオロエチレン)などのプラスチック材料
2	400...599	プリント回路基板(PCB)基材 FR4 タイプ KF
3a	175...399	ガラス充填 PCB 材料 FR4
3b	100...174	箔材料ポリイミド(例:カプトン)または樹脂(例:フェノール)

沿面電流の損傷効果は長年の課題です。ここで決定的なのは、印加電圧の実効値であり、ピーク値ではありません。この為、実効電圧の計算期間は、少なくともアプリケーションのサイクル時間となります。

電圧の最初の高調波間の位相シフトは、RMS 電圧を追加することによって考慮する必要があります。多くの場合、シフトは不明であるか、または多大な労力をかけてのみ識別できます。この為、ここでは最悪のケースが考慮され、電圧の 2 次和 ($V_{1,3} =$

$\sqrt{V_{1,2}^2 + V_{2,3}^2}$) が使用されます。一方、これは結果として得られる電圧の合計が決定的でないことがあることを意味します。

規格で要求される最小沿面距離は、主に経験的に決定されており、プリント回路基板(PCB)のトラッキング抵抗は、実験セットアップで最大 1000V の電圧と汚染度 1 および 2 に対してのみ決定され、その結果が要件として採用されました。この為、ここで必要な距離は、PCB 材料の実際の CTI よりもはるかに小さくなります。

最小の沿面距離は、少なくとも空間距離です。この為、沿面距離は少なくとも空気中の空間距離と同じ長さでなければなりません。トラッキングしないガラスやセラミックなどの無機絶縁材料の場合、沿面距離は関連する空間距離と同じになることがあります。

3.3 固体絶縁

固体絶縁は、空気やガスのみで作られる絶縁ではありません。一部の規格では、最低限の材料の厚さが要求され、材料としてのコーティングが認められなかったり、PCB に特別な要件があったりします。要求を一般化することは不可能であり、関連する製品規格を確認する必要があります。固体絶縁体が電圧負荷に耐えられるかどうかを確認するには、3 つの試験を実行できます。

- インパルス耐電圧試験
- 交流または直流電圧試験
- 部分放電試験

理想的には、部分放電開始電圧は、予想される最大ピーク電圧よりも高い必要があります。そうすると部分放電は発生しなくなります。部分放電消滅電圧は、継続的に存在する電圧よりも高くなければなりません。部分放電が始まったら、安全に再び中断する必要があります。一部の規格では、保護分離絶縁のみの部分放電試験が要求されています。機器ではなくコンポーネントで試験を実行することが許可されています。

絶縁協調とは、コンバータ内の各電位に対する絶縁の種類と実現を相関させ、関連する規格が要求する距離や試験電圧などの最小要件を見つけることです。

4. 規格

4.1 欧州および国際規格

高電圧機器(>1000V_{ac} または 1500V_{dc})と低電圧機器(>1000V_{ac} または 1500V_{dc})は別々に考慮する必要があります。どちらも、基本的な要件を含む独自の基本規格を持っています。グリッドに接続された高電圧機器の場合は EN60071-1、低電圧機器の場合は EN60664-1 です。製品規格および製品グループ規格は通常、これらの基本規格を参照する為、すべての機器の要件は、使用される規格からほぼ独立しています。コンバータの絶縁協調には、一般的に適用される規格がいくつかあります。

グリッドに接続されていない機器の規格は、通常、指定された基本規格に基づいていません。鉄道用途の EN50124-1 など、絶縁に関して厳しい要件が求められる場合もあります。

表 5: 絶縁協調に関する欧州規格の選択		
EN60071-1	絶縁協調 - 定義、原則、ルール	基本規格
EN60664-1 [3]	定電圧システム内の機器の絶縁協調、原則、要件、試験	基本規格
EN50178	電力設備で使用する電子機器	製品グループ規格
EN62477-1 [4]	電力電子変換システムおよび機器の安全要件 - 一般	製品グループ規格
EN61204-7	低電圧電源、直流出力 - 安全要件	製品規格
EN61800-5-1 [5]	可変速電力駆動システム - 安全要件 - 電気、熱、エネルギー	製品規格
EN62040-1	無停電電源システム(UPS) - UPS の一般要件と安全要件	製品規格
EN62109-1 [6]	太陽光発電システムで使用する電力変換器の安全性 - 一般要件	製品規格
EN50124-1	鉄道用途 - 絶縁協調 - 基本要件 - すべての電気および電子機器の空間距離と沿面距離	製品規格

4.2 UL 規格

一般的に、UL の絶縁協調は IEC または EN 規格に基づいていません。この為、要件は大幅に異なります。デバイスに UL 承認を求める場合、絶縁は 2 回適合されます。1 回は欧州/国際規格用、もう 1 回は UL 用です。

UL の絶縁に関する基本要件は、UL 規格 UL840 で最大 1500V の相対対地定格システム電圧に対して規定されています。さまざまな UL 製品規格の要件は、この基本規格に基づいて確立されるか、またはこの基本規格の絶縁要件を代わりに使用することが許可されます。

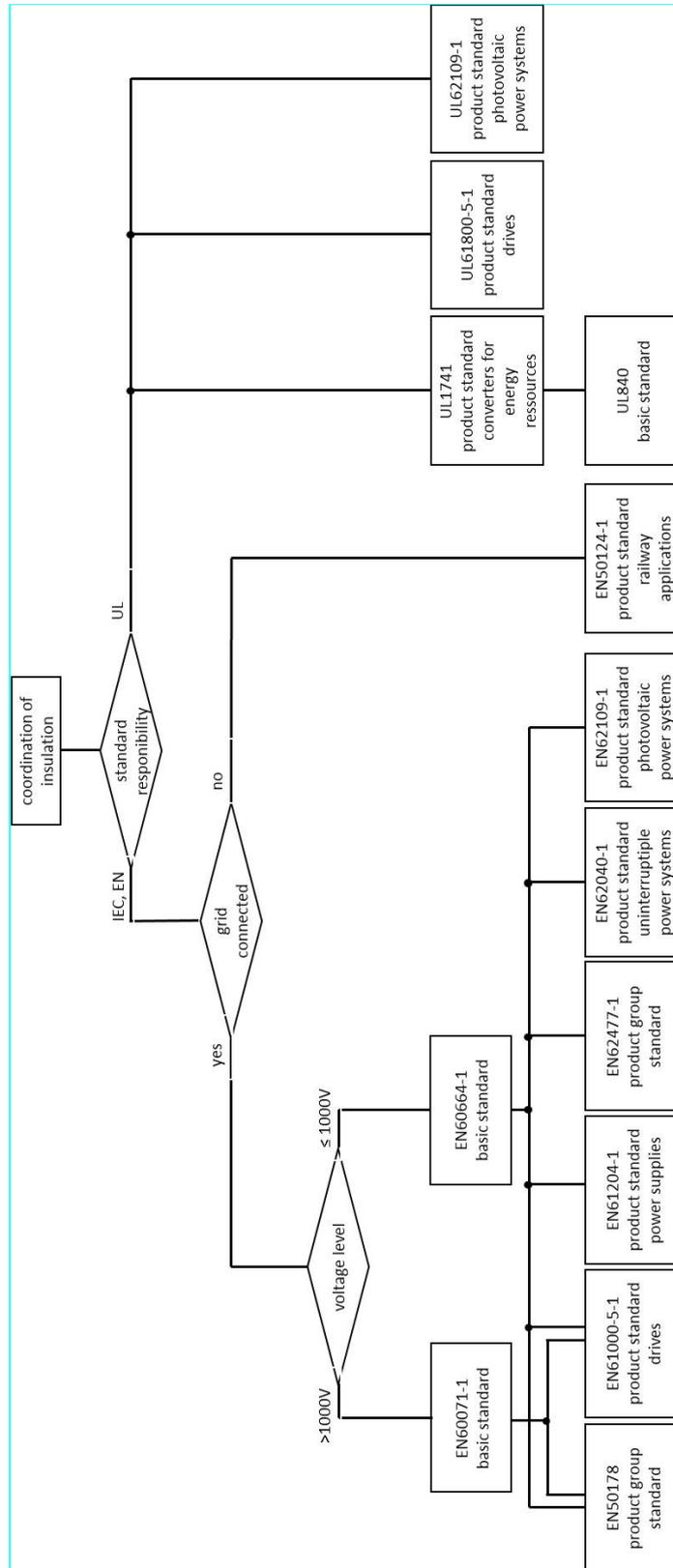
ほとんどの UL 規格では、機能絶縁と基本絶縁を区別することは許可されていません。その結果、ほとんどの場合、IEC 規格や EN 規格と比較して回路内の空間距離が高くなります。通常、IEC 規格と EN 規格のみに従って設計されたデバイスは、UL 絶縁要件を満たしません。

表 6: 絶縁協調の為の UL 規格の選択			
UL840	電気機器の沿面距離と沿面距離を含む絶縁協調	基本規格	
UL1741	分散型エネルギー資源に使用するインバータ、コンバータ、コントローラー、相互接続システム機器	製品規格	UL840 を代わりに使用できます
UL61800-5-1 [7]	可変速電力駆動システム - パート 5-1: 安全要件 - 電気、熱、エネルギー	製品規格	
UL62109-1	太陽光発電システムで使用する電力変換器の安全性 - パート 1: 一般要件	製品規格	

UL61800-5-1 と UL62109-1 は、EN61800-5-1 と EN62109-1 と同じではありません。例えば、フィールド配線端子の間隔は大きく異なります。UL61800-5-1 と UL62109-1 では、ここでより大きな距離が要求されます。相違点の一覧は、両方の規格の序文に記載されています。

産業用途の絶縁協調に一般的に使用される規格の構造を以下に示します。

図 2: コンバータの絶縁協調の為に選択された規格の構造



5. セミクロンダンフォスモジュール

通常、セミクロンダンフォスのコンポーネントは、EN61800-5-1 規格に従って設計されています。コンポーネントのデータシートに特に記載がない限り、絶縁の寸法はモジュールの阻止電圧クラスによって異なります。同じ製品ラインで同じハウジングサイズのモジュールは、このモジュールタイプで利用可能な最大の阻止電圧に合わせて設計されています。例えば、MiniSKiiP 38Acxxx は、600V、1200V、1700V のチップで使用できます。チップ電圧以外は、常に同じハウジングが使用されます。絶縁の寸法は、最大電圧(例: 1700V)のモジュールに合わせて決定されます。

表 7: セミクロンダンフォスが EN61800-5-1 に従って絶縁協調に使用する標準仕様

阻止電圧クラス	DC リンク電圧	グリッド電圧	グリッド構成	過電圧カテゴリ	高度	汚染度
600V/650V	400V	230V	スター(wye) アース TN-C システム	3	2000m	2
1200V	900V	480V				
1700V	1200V	690V				

2 の定義によると、モジュール端子間には機能絶縁が施されています。端子とベースプレート間には、基本絶縁が使用されています。統合された「電位フリー」温度センサーを備えたモジュールでは(データシートの回路図に示されているように)、センサーと電源回路間に機能絶縁が使用されています。

セミクロンダンフォスのデータシートに記載されているモジュール絶縁試験電圧 V_{isol} は、EN61800-5-1 の要求よりも高い電圧を示しています。これは、モジュールが鉄道用途などの他の規格に従って使用される可能性がある為です。従って、指定された試験電圧から、絶縁協調にどの仕様が使用されたかを結論付けることはできません。

6. ACドライブの例

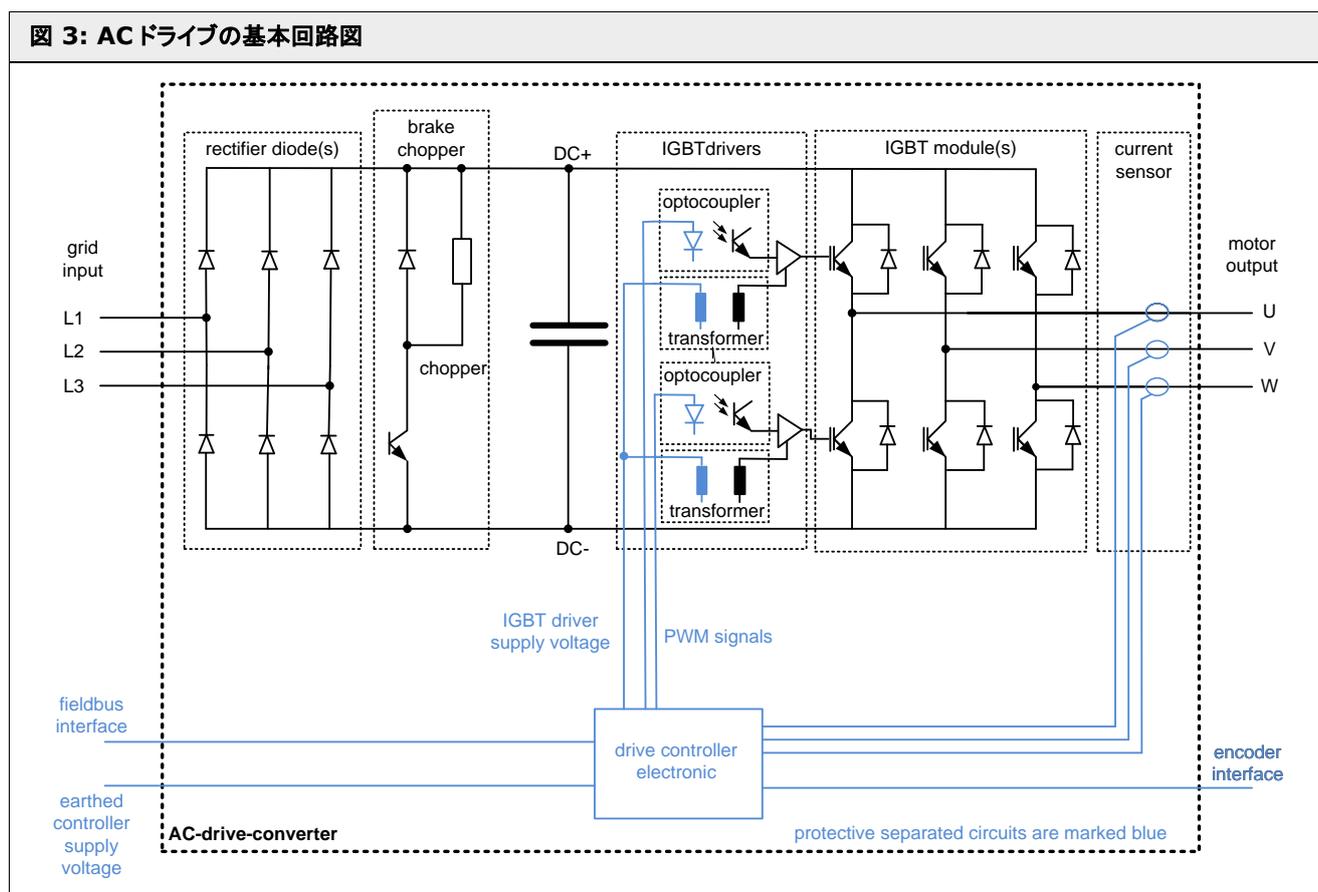
6.1 仕様

産業用 ACドライブには、絶縁協調の手順に関連する次の仕様があります。

- 入力: 3 x 400V、50Hz、TN-C システムのみ
- 出力: 3 x 370V、0~300Hz
- ブレーキチョップ: DC ターンオンレベル 830V、DC ターンオフレベル 800V
- DC リンク: $\leq 845V$
- 高度: $\leq 4000m$
- 汚染: 導電性のほこりや結露がない
- フィールドバスインターフェース: CAN
- エンコーダーインターフェース: リゾルバー
- コントローラー電源: 24V PELV

その他のパラメータは絶縁体の寸法には関係ありません。

図 3: ACドライブの基本回路図



ドライブの場合、関連する製品規格は EN61800-5-1 です。このアプリケーションノートで説明する絶縁協調手順は、この規格に基づいています。適用される手順は、製品グループ規格 EN62477-1 の要件に似ています。

ドライブに有線フィールドバスインターフェイス (この場合は CAN)、エンコーダーインターフェイス (この場合はリゾルバー)、および接地されたコントローラー電源電圧があるという情報から、ドライブ コントローラーエレクトロニクスは接地されており、何らかの形で触れることができる (例: コネクタ ピン) と推測できます。つまり、ACドライブ制御インターフェイスを含むコントローラーエレクトロニクスと電源回路の間には、強化絶縁または二重絶縁による保護分離が必要です。

この規格では、絶縁要件を決定する為に使用されるシステム電圧の概念が導入されています。400V の相間電圧 (ドライブの指定入力電圧) の TN-C システムでは、対地電圧は $400V/\sqrt{3} = 230V$ です。EN61800-5-1、表 7 では補間が許可されていません。従って、表から次に高い値である 300V を取得する必要があります。従って、システム電圧はここで 300V になります。絶縁は汚染の影響を受けます。導電性の粉塵や結露が許されないという情報は汚染度 2 (EN61800-5-1、表 6) と関連しています。

6.2 空間距離

ドライブは高度 4000m まで対応するように規定されている為、すべての空間距離に対して高度補正係数を考慮する必要があります。EN60664-1 の表 A2 によると、4000m の係数は 1.29 です。

6.2.1 機能絶縁として使用される空間距離

機能絶縁の場合、動作電圧の繰り返しピークが関係します。最悪の場合、これは電力回路内のすべてのポイント間で使用されている半導体モジュールの阻止電圧になります。EN61800-5-1、表 9、列 2 および 4 によれば、1200V のピーク動作電圧には 0.9mm の空間距離が必要です (規定された ACドライブ入力電圧の標準的な 1200V モジュールがドライブに使用されると想定)。0.9mm は、規格で明示的に許可されている 960V と 1600V の表の線間の線形補間の結果です。ここで、必要な距離の値は常に安全な方向に 1 桁に丸められます。

$$d = 0.5mm + \frac{1.5mm - 0.5mm}{1600V - 960V} \cdot (1200V - 960V) = 0.875mm \approx 0.9mm$$

過電圧カテゴリ 1 に必要な空間距離は 0.5mm のみであり要件が弱い為、結果的に考慮する必要はありません(300V システム電圧および過電圧カテゴリ 1 の衝撃電圧は、EN61800-5-1、表 7、列 2 によれば 1500V であり、EN61800-5-1、表 9、列 5 によれば空間距離は 0.5mm になります)。高度補正係数 1.29 を考慮すると、機能絶縁に必要な空間距離は 1.2mm(≈ 0.875mm · 1.29)です。この値は、相間、相から DC まで、または上部(TOP)と下部(BOT)IGBT のゲート間など、電力回路内のすべての空間距離に適用する必要があります。

電源回路内の実際の電圧は阻止電圧よりも低くなる可能性があります、この為空間距離が小さくなる可能性があります。一方、ほとんどの場合、沿面距離は機能絶縁に対するより強い要求であり、特に高度補正係数を考慮する必要がない場合はそうです。従って、空間距離の決定に阻止電圧を採用することは実質的な制約ではありません。

6.2.2 基本絶縁として使用される空間距離

AC ドライブは、グリッドから電力が供給される固定産業設備で使用されます。このような機器に予想される過電圧は、カテゴリ 3 (EN61800-5-1、4.3.6.1.3)です。

システム電圧(ここでは 300V、上記参照)と過電圧カテゴリによって、空間距離を決定する為に必要なインパルス電圧(EN61800-5-1、表 7、列 4)が決まります。300V の場合、インパルス電圧は 4000V となり、これは 3mm の空間距離に相当します(EN61800-5-1、表 9、列)。3mm の空間距離では最大 1600V の動作電圧が許容されます(EN61800-5-1、表 9、列 3)。これは、ドライブで予想される電圧よりもはるかに高い値です。従って、ここでは過電圧カテゴリの要件が最も厳しくなります。高度補正係数を考慮すると、基礎絶縁に必要な空間距離 3.9 mm(≈ 3mm · 1.29)です。

この値は、ヒートシンクやハウジングなどの接地された導電性部品と、入力端子、出力端子、DC リンク、または PCB 上のグリッド電圧回路の露出部分などの電源回路との間のすべての空間距離に適用する必要があります。

6.2.3 保護分離として使用される空間距離

システム電圧、過電圧カテゴリ、および結果として生じるインパルス電圧の決定は、基本絶縁の場合と同じです。保護分離では、障害がユーザーにとって致命的となる可能性がある為、必要な空間距離は基本絶縁よりも高くなります。表中の次に高い値に対応するインパルス電圧を使用する必要があります。強化絶縁によって実現される保護分離の場合は 6000V です(EN61800-5-1、表 9、列 1)。6000V のインパルス電圧の場合、空間距離は 5.5mm です(EN61800-5-1、表 9、列 5)。動作電圧からの必要な空間距離は基礎絶縁の場合と同じであり、過電圧カテゴリからの要件よりも弱くなります。高度補正係数を考慮すると、強化絶縁材料に必要な空間距離は 7.1mm です(≈ 5.5mm · 1.29)。この距離は、電源回路(入力端子、出力端子、DC リンクまたは IGBT ゲートなど)と AC ドライブ コントローラーの電子機器(エンコーダーインターフェイス、電流センサー フィードバック、PWM 信号、またはドライブコントローラー自体)間のすべての空間距離に確保する必要があります。

6.3 沿面距離

ポッティング材またはコーティング材は、汚染から保護する為に PCB に使用でき、汚染度 1 が適用される保護(EN61800-5-1、4.3.6.6)の下にある部品の微小環境を改善します。ポッティング材またはコーティング材は、EN60664-3(EN61800-5-1、4.3.6.8.4.2) に従った試験に合格する必要があります。

ここで説明する AC ドライブでは、汚染から保護する為にポッティング材またはコーティング材は使用されていないものと想定されています。

6.3.1 機能絶縁として使用される沿面距離

検討対象の AC ドライブが PCB のみで構成され、その他の絶縁関連コンポーネントは含まれていないと仮定すると、沿面距離については EN61800-5-1 の表 10 の列 3 が関係します。DC+ と DC- の間にホイルなど、その他の絶縁体を使用されている場合は、列 5 から 8 までの沿面距離を取得して絶縁の絶縁カテゴリが考慮されます。すべての沿面距離について、電圧の補間が明示的に許可されています。

AC ドライブ内の電位間の RMS 電圧は、次々に計算する必要があります。AC ドライブに負荷がかかっていない場合、DC リンクはグリッド電圧のピーク電圧 $V_{dc} = 400V \cdot \sqrt{2} = 566V$ にさらされます。

チョップが動作時間の 1% で動作すると仮定すると、DC リンク電圧は最悪の場合 569V と計算できます。

$$V_{dc} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{0.99T} (566V)^2 dt + \int_{0.99T}^T (830V)^2 dt \right)} = 569V$$

チョップ動作が RMS 電圧に与える影響は非常に小さい為、チョップ電圧自体を除いて、次の計算では考慮されません。入力相の 1 つと DC+ または DC- 間の電圧は 365V と計算されます。

$$V_{L,DC+} = \sqrt{(V_{DC+,earth})^2 + (V_{L,earth})^2} = \sqrt{(0,5 \cdot V_{dc})^2 + \left(\frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{(0,5 \cdot 566V)^2 + \left(\frac{400V}{\sqrt{3}}\right)^2} = 365V$$

モータ相から DC+ または DC- への電圧も同様に計算されますが、 $V_{LL} = 400V$ の代わりに $V_{UV} = 370V$ が使用されます。ドライブの入力相から出力相への電圧は、DC+ への電圧の合計です。

$$V_{L1,U} = \sqrt{V_{L1,DC+}^2 + V_{DC+,U}^2} = \sqrt{(365V)^2 + (355V)^2} = 509V$$

チョップは 99% の時間オフになっています。この期間に、DC+ 電圧がチョップ IGBT のコレクタに印加されます。残りの 1% の時間では、IGBT がオンになり、チョップのターンオフ電圧が DC リンクに印加されます。チョップ IGBT のコレクタの DC- に対する RMS 電圧は 563V と計算され、DC+ に対する RMS 電圧は 83V です。

$$V_{Chopper,DC-} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{0,99T} (566V)^2 dt + \int_{0,99T}^T (2V)^2 dt \right)} = 563V$$

$$V_{Chopper,DC+} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{0,99T} (2V)^2 dt + \int_{0,99T}^T (830V)^2 dt \right)} = 83V$$

相からチョップ IGBT への電圧は、相と DC+ 間および DC+ とチョップ間の既に計算された電圧の合計です。

$$V_{Chopper,L1} = \sqrt{(365V)^2 + (83V)^2} = 374V$$

$$V_{Chopper,U} = \sqrt{(355V)^2 + (83V)^2} = 365V$$

これらの電圧に基づいて、沿面距離は EN61800-5-1 の表 10、列 3 から取得されます。表にはすべての電圧レベルが記載されているわけではないので、明示的に許可されている補間を使用できます。例えば、電圧 $V_{L1,U} = 509V$ の場合、沿面距離は 2.6mm と計算されます。

$$d_{L1,U} = 2.5mm + \frac{3.2mm - 2.5mm}{630V - 500V} \cdot 9V = 2,55mm \approx 2,6mm$$

表 8: EN61800-5-1 の機能絶縁に対する適用 RMS 電圧と関連する沿面距離

		L1	L2	L3	DC+	DC-	チョップ	U	V	W
		印加 RMS 電圧 [V]								
L1	EN61800-5-1、表 10 から計算された沿面距離 [mm]		400	400	365	365	374	509	509	509
L2		2.0		400	365	365	374	509	509	509
L3		2.0	2.0		365	365	374	509	509	509
DC+		1.9	1.9	1.9		566	83	355	355	355
DC-		1.9	1.9	1.9	2.9		563	355	355	355
chopper		1.9	1.9	1.9	0.2	2.9		365	365	365
U		2.6	2.6	2.6	1.8	1.8	1.9		370	370
V		2.6	2.6	2.6	1.8	1.8	1.9	1.9		370
W		2.6	2.6	2.6	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	

沿面距離は少なくとも決定された空間距離 1.2 mm の距離が必要であることを考慮すると、新しい表が作成されます。空間距離要件による距離値の増加は青色でマークされます。

表 9: ACドライブの機能絶縁に必要な RMS 電圧と沿面距離

		L1	L2	L3	DC+	DC-	チョップパ	U	V	W
		印加 RMS 電圧 [V]								
L1	空間距離を考慮した必要沿面距離 [mm]		400	400	365	365	374	509	509	509
L2		2.0		400	365	365	374	509	509	509
L3		2.0	2.0		365	365	374	509	509	509
DC+		1.9	1.9	1.9		566	83	355	355	355
DC-		1.9	1.9	1.9	2.9		563	355	355	355
chopper		1.9	1.9	1.9	1.2	2.9		355	355	355
U		2.6	2.6	2.6	1.8	1.8	1.9		370	370
V		2.6	2.6	2.6	1.8	1.8	1.9	1.9		370
W		2.6	2.6	2.6	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	

IGBT のゲートの電圧は、エミッタに対して+15V から-15V の間です。この値は非常に低い為、対応する沿面距離はわずか 0.04 mm であり、これ以上考慮されません。ゲートから他のすべての電位への沿面距離は、同じ IGBT のエミッタからの沿面距離と同じです。従って、すべての上部 IGBT は位相に対して同じであり、下部 IGBT は DC-に対して同じです。

6.3.2 基礎絶縁として使用される沿面距離

スター接地 TN-C グリッドでは、DC 電圧はアースに対してバランスが取れています。従って、DC+または DC-からアースへの電圧は、DC リンク電圧の半分になります。入力相と出力相からアースへの電圧は、相間電圧を $\sqrt{3}$ で割った値になります。チョップパ IGBT のコレクタへの電圧は、アースへの DC 電圧と DC とチョップパ間の電圧の差です。

$$V_{chopper,earth} = \sqrt{(283V)^2 - (83V)^2} = 271V \text{空間距離}$$

次に、必要な空間距離が沿面距離表の値よりも高いかどうかを確認する必要があります。必要に応じて、沿面距離を空間距離レベル(EN61800-5-1、4.3.6.5.1)まで増加する必要があります。ここではその場合について説明します。

表 10: 基礎絶縁に適用される RMS 電圧と必要な沿面距離

	L1	L2	L3	DC+	DC-	チョップパ	U	V	W
印加 RMS 電圧 [V]	230	230	230	283	283	271	214	214	214
EN61800-5-1、表 10 の沿面距離 10 [mm]	0.9	0.9	0.9	1.2	1.2	1.2	0.8	0.8	0.8
空間距離を考慮した必要沿面距離 [mm]	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9

6.3.3 保護分離として使用される沿面距離

強化絶縁または二重絶縁によって実現される、保護分離の沿面距離を決定する為の電圧は基本絶縁の場合と同じですが、沿面距離の要件は高くなります。EN61800-5-1、表 10、列 3 の距離を 2 倍にする必要があります。次に、空間距離列 3 の値の 2 倍の距離よりも高いかどうかを確認する必要があります。必要に応じて、沿面距離を空間距離レベル(EN61800-5-1、4.3.6.5.1)まで増やす必要があります。ここではその場合です。

表 11: 保護分離の為に印加 RMS 電圧と必要な沿面距離

	L1	L2	L3	DC+	DC-	チョップパ	U	V	W
印加 RMS 電圧 [V]	230	230	230	283	283	271	214	214	214
EN61800-5-1、表 10 の沿面距離の 2 倍 [mm]	1.7	1.7	1.7	2.4	2.4	2.4	1.5	1.5	1.5
空間距離を考慮した必要な沿面距離 [mm]	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1

6.4 固体絶縁

ポッティング材またはコーティング材は、固体絶縁材として PCB 上で使用できます。この場合、ポッティング材またはコーティング材は、EN60664-3(EN61800-5-1、4.3.6.8.4.2)に準拠した試験に合格する必要があります。

ここでは、AC ドライブに固体絶縁体としてのポッティングまたはコーティング材料がないものと想定します。

多層 PCB の内層の場合、同じ層上の隣接するトラック間の絶縁は、汚染度 1 の沿面距離と空気中の空間距離(上記の要件を参照)として扱うか、固体絶縁(EN61800-5-1、4.3.6.8.4.1)として扱う必要があります。

6.4.1 機能絶縁材として使用される固体絶縁材

一般に、この規格には機能絶縁に関する特別な要件はありません。故障が発生しても、寿命に致命的な影響を与えることはありません。試験は必要ありません。故障が致命的な結果をもたらす可能性がある場合、機能絶縁の要件は基本絶縁と同じになります。考慮する必要がある電圧は、空間距離と沿面距離の場合と同じです。この AC ドライブでは、致命的な結果は発生しないと想定されています。

6.4.2 基礎絶縁材として使用される固体絶縁材

固体絶縁が電圧ストレスに耐えられることを確認する為に、コンポーネント、サブアセンブリ、および多層 PCB の層に対して 2 つの試験を実行する必要があります。ここでは、AC ドライブにはスクリーニング用の PCB 上にアースされた内層があることが前提となります。

インパルス耐電圧試験は、型式試験として実行する必要があります。さらに、EN61800-5-1、表 19、列 4 に従って、補間が許可されているルーチン試験を実行する必要があります。接地された TN-C グリッド内の相間電圧が 400V の AC ドライブのシステム電圧は 230V である為、相関試験インパルス耐電圧は 3300V です。同じシステム電圧に対して、1430Vac または 2020Vdc で、EN61800-5-1、表 21、列 2 に従って、AC または DC 電圧試験を実行する必要があります。

750 μ m より薄い絶縁材は、PCB の内層の場合のように機械的ストレスを受けてはなりません。

IGBT モジュールのチップ付き銅トラックから、モジュールベースプレートまでの外部絶縁も同様の方法で検査されます。この場合、固体絶縁は、ソフトモールドで満たされたモジュールとモジュールハウジングの直列接続です。

6.4.3 保護分離として使用される固体絶縁体

保護分離の為に、コンポーネント、サブアセンブリ、および多層 PCB の層に対して 3 つの試験を実行する必要があります。ここで検討する AC ドライブには、PWM 信号用のフォトカプラと IGBT ゲートドライバーの電源用のトランスがあります。コントローラー電圧から供給されます。これらはすべて PCB に搭載されています。

インパルス耐電圧試験は、型式試験として実行し、さらにシステム電圧 230V に対して EN61800-5-1、表 19、列 5 に従ってルーチン試験を実行する必要があります。インパルス耐電圧は 5067V です。同じシステム電圧に対して、2860Vac または 4040Vdc で EN61800-5-1、表 21、列 3 に従って AC または DC 電圧試験を実行する必要があります。1430Vac または 2020Vdc で列 2 に従って、トランスに対してルーチン試験をさらに実行する必要があります。

PCB の層間の電圧が 750Vpeak を超え、層間の絶縁体の電界が 1000V/mm を超える場合は、型式試験として部分放電試験を実施する必要があります(4.3.6.8.2.2)。ここでは、保護分離に使用される PCB の絶縁層は 1 つだけなので、追加のサンプル試験を実行する必要があります。ここで使用されるトランスは、絶縁体全体の電圧ストレスが 1000V/mm 未満になるように設計されている為、トランスの部分放電試験は必要ありません。

PCB の部分放電試験は、EN61800-5-1 の表 24 に従って実行する必要があります。DC 電圧が 566V の AC ドライブでは、モー

タケールとモータの寄生効果により、通常、コモンモード電圧(対地電圧)が約 1000V_{peak} になります。従って、部分放電消滅電圧のピーク電圧は少なくとも

$$V_{PD\text{extinction}} = 1.5 \cdot 1000V_{\text{peak}} = 1500V_{\text{peak}}$$

である必要があります。

6.5 ACドライブの概要

標高 4000 メートルの ACドライブの例について、EN61800-5-1 に準拠した絶縁協調の結果を次の表にまとめます。

表 12: EN61800-5-1 に準拠した ACドライブの絶縁要件				
EN61800-5-1		絶縁の種類		
		機能絶縁	基礎絶縁	保護分離
絶縁の実現	空間距離	1.2mm	3.9mm	7.1mm
	沿面距離	1.2mm ~ 2.9mm	3.9mm	7.1mm
	固体絶縁			
	インパルス耐圧試験電圧	-	3300V	5067V
	AC または DC 試験電圧	-	1430V _{ac} または 2020V _{dc}	2860V _{ac} または 4040V _{dc}
	部分放電消滅電圧	-	-	1500V _{peak}

同様のアプリケーション(ドライブではなく、加熱用コンバータなど)の場合、絶縁協調は EN62477-1 に従って行われます。仕様は AC ドライブと同じですが、ヒーターにはブレーキチョップやエンコーダがないことを考慮します。この場合、すべての絶縁協調要件は EN61800-5-1 の場合と同じになります。

7. 太陽光発電コンバータの例

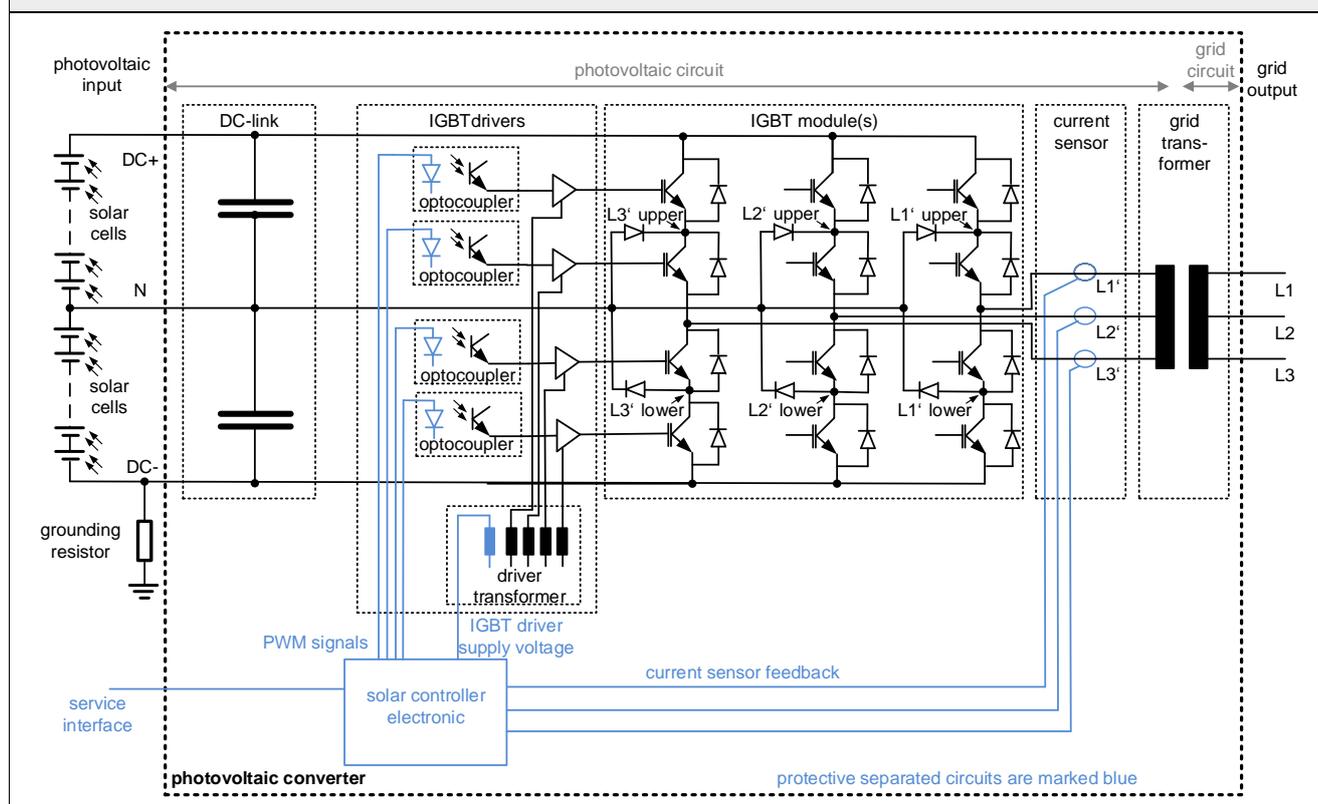
7.1 仕様

太陽光発電コンバータには、絶縁協調の手順に関連する次の仕様があります。

- 入力太陽光発電電圧: $\leq 1500V_{dc}$
- 出力主電源電圧: $V_{LL} = 3 \times 400V_{ac}$, 50Hz, TN-C システムのみ
- グリッド変圧比 $800V_{ac} / 400V_{ac}$
- DC-での接地抵抗
- 高度: $\leq 3000m$
- 空調のない室内での使用
- コンバータ筐体 IP54
- ソーラーコントローラへのサービスインターフェイス

その他のパラメータは、絶縁体の寸法設定には関係ありません。

図 4: 太陽光発電コンバータの基本図



太陽光発電コンバータの関連製品規格は EN62109-1 です。ここで説明する絶縁協調手順は、この規格に基づいています。この手順は、製品グループ規格 EN62477-1 の要件と非常に似ています。

コンバータにソーラーコントローラー用のサービスインターフェイスがあるという情報は、電源回路とコントローラーエレクトロニクスとの間に、強化絶縁または二重絶縁によって実現される保護分離が必要であることを意味します。電力回路と接地部分の間には基本絶縁が必要です (EN62109-1、表 8)。電力回路は、太陽光発電回路とグリッド回路で構成されます。両者は変圧器を使用した電気絶縁によって互いに分離されています。太陽光発電回路には過電圧カテゴリ 2 (EN62109-1、7.3.7.1.2、b)、グリッド回路にはカテゴリ 3 (EN62109-1、7.3.7.1.2、a) が想定されています。回路内に適用される過電圧カテゴリは 1 つ低いカテゴリ (EN62109-1、7.3.7.1.2、f) で、ここでは太陽光発電回路にはカテゴリ 1、グリッド回路にはカテゴリ 2 が想定されています。さらに、グリッド回路の過電圧レベルが太陽光発電回路に影響を与えること、またその逆も考慮する必要があります。グリッド変圧器の電気絶縁により、過電圧カテゴリが両方向で 1 レベル低下します (EN62109-1、7.3.7.1.2、c)。

システム電圧は、絶縁要件を決定する為に使用されます (EN62109-1、7.3.7.2.1)。400V の相間電圧 (= コンバータの指定出力電圧) を備えた TN-C システムは、グリッド側にあります。ここでのグリッド側システム電圧は、相からアースまで $400V/\sqrt{3} = 230V$ です。太陽光発電システムの電圧は、最大定格太陽光発電開回路電圧 (EN62109-1、7.3.7.2.3) であり、この場合は 1500V です。太陽光発電回路が抵抗器で接地されているかどうかは、システム電圧の決定には関係ありません。

絶縁も汚染の影響を受けます。コンバータが空調のない室内で使用されるという情報は、汚染度 3 (EN62109-1、表 4) に相当します。コンバータ筐体またはコンバータが設置されているキャビネットは、EN60529 に準拠した IP5X であり、内部で汚染は発生しません。その為、汚染度を 3 度から 2 度に下げることができます (EN62109-1、表 5)。

7.2 空間距離

太陽光発電コンバータは高度 3000m まで対応している為、すべての空間距離に対して高度補正係数を考慮する必要があります。係数は 1.14 (EN62109-1、表 F.1) です。

7.2.1 機能絶縁として使用される隙間

機能絶縁に関しては動作電圧のみが関係します。必要な過電圧カテゴリが 1 のみの場合、過電圧カテゴリから生じるインパルス耐電圧は考慮されません(EN62109-1、7.3.7.3)。太陽光発電回路の最悪の動作電圧は、使用されている半導体の阻止電圧です。EN62109-1 の表 13、列 2 および 4 によれば、NPC トポロジーで典型的であるように、1200V の阻止電圧を持つ半導体が太陽光発電コンバータに使用されると仮定すると、1200V の繰り返しピーク動作電圧に対して 0.9mm の空間距離が必要です[9]。0.9mm という値は、表の 960V と 1600V ライン間の線形補間の結果であり、規格では明示的に許可されており、安全な方向に 1 桁に丸められています。

$$d = 0.5mm + \frac{1.5mm - 0.5mm}{1600V - 960V} \cdot (1200V - 960V) = 0.875mm \approx 0.9mm$$

機能絶縁に必要な空間距離は、高度補正係数 1.14 を考慮すると 1mm (=0.875mm · 1.14) です。この距離は、電力回路内の各半導体上の空間距離に取らなければなりません。

NPC トポロジーでは、少なくとも 2 つの半導体が同時に全電圧を遮断する必要があります[9]。2 · 1200V = 2400V の繰り返しピーク動作電圧には 2.7mm の空間距離が必要です(EN62109-1、表 13、列 2 および 4)。

$$d = 1.5mm + \frac{3.0mm - 1.5mm}{2600V - 1600V} \cdot ((2 \cdot 1200V) - 1600V) = 2.7mm$$

高度補正係数 1.14 を考慮すると、機能絶縁に必要な空間距離は 3.1mm(≈2.7mm · 1.14) です。

変圧器上の必要な空間距離は、変圧器により 1 つの過電圧カテゴリによって低減されるインパルス電圧により決定されます(EN62109-1、7.3.7.1.2 c)。グリッドシステム電圧 230Vrms および過電圧カテゴリ 3 は、インパルス電圧 4000V および過電圧カテゴリ 2 2500V に相当します(EN62109-1、表 12)。これは、3mm と 1.5mm の空間距離を意味します(表 13)。その差は 1.5mm です。過電圧カテゴリ 2(6000V インパルス電圧 -> 5.5mm 空間距離)と過電圧カテゴリ 1(4000V インパルス電圧 -> 3mm 空間距離)の場合、1500Vdc の太陽光発電システム電圧に対して同じ手順を繰り返す必要があります。ここでの差は 2.5mm で、グリッドシステム電圧で決定された値よりも大きくなります。高度補正係数を考慮すると、必要な空間距離は 2.9mm (≈ 2.5mm · 1.14) になります。

相間のグリッド電圧の過電圧カテゴリは、アースに対するものより 1 つ低いカテゴリです(EN62109-1、7.3.7.1.2 f)。従って、これは過電圧カテゴリ 2 であり、グリッドシステム電圧が最大 300V の場合、これは 2500V のインパルス電圧を意味します(EN62109-1、表 12)。表 13 によると、空間距離は 1.5mm であり、これに高度補正係数を掛ける必要があります。位相間の必要な空間距離は 1.8mm(≈1.5mm · 1.14) です。

表 13: EN62109-1 に基づく適用される動作電圧、またはインパルス電圧と関連する空間距離

		DC+	DC-	N	L1' upp	L2' upp	L3' upp	L1' low	L2' low	L3' low	L1'	L2'	L3'	L1	L2	L3
		最大印加動作電圧またはインパルス電圧 [V]														
DC+	EN62109-1、表 13 [mm] から計算された空間距離、表 F.1 の高度補正係数 1.14 を考慮して算出されます。		2400	2400	1200	1200	1200	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
DC-		3.1		2400	2400	2400	1200	1200	1200	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
N		3.1	3.1		1200	1200	1200	1200	1200	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
L1'upp		3.0	3.1	1.0		1200	1200	1200	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
L2'upp		1.0	3.1	1.0	1.0		1200	2400	1200	2400	2400	1200	2400	2400	1200	2400
L3'upp		1.0	3.1	1.0	1.0	1.0		2400	2400	1200	2400	2400	1200	2400	2400	1200
L1'low		3.1	1.0	1.0	1.0	3.1	3.1		1200	1200	1200	2400	2400	1200	2400	2400
L2'low		3.1	1.0	1.0	3.1	1.0	3.1	1.0		1200	2400	1200	2400	2400	1200	2400
L3'low		3.1	1.0	1.0	3.1	3.1	1.0	1.0	1.0		2400	2400	1200	2400	2400	1200
L1'		3.1	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1		2400	2400	2000	2000	2000
L2'		3.1	3.1	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1		2400	2000	2000	2000
L3'		3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1		2000	2000	2000
L1		3.1	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1	2.9	2.9	2.9		1500	1500
L2		3.1	3.1	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1	1.0	3.1	2.9	2.9	2.9	1.8		1500
L3		3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1	1.0	2.9	2.9	2.9	1.8	1.8	

黒く書かれた電圧は動作電圧で、青で書かれているのはインパルス電圧です。

電源回路内の実際の電圧は、ブロッキング電圧よりも低くなる可能性があります、この為空間距離が小さくなる可能性があります。一方、機能絶縁では沿面距離が強く要求されることがほとんどです。従って、空間距離の決定にブロッキング電圧を採用することは実質的な制約にはなりません。

7.2.2 基礎絶縁として使用される隙間

基礎絶縁の空間距離は、太陽光発電回路と系統電力回路に対して 2 段階で決定されます。

太陽光発電回路

太陽光発電システムの電圧は 1500Vdc で、過電圧カテゴリ 2 であり、これは 6000V インパルス電圧に相当します (EN62109-1、表 12)。230Vac および過電圧カテゴリ 3 のグリッドシステム電圧は、変圧器によって太陽光発電回路の過電圧カテゴリ 2、つまり 2500V のインパルス電圧に低減されます。太陽光発電システムの電圧要求はより高く (6000V ~ 2500V のインパルス電圧)、従って、表 13 の空間距離を決定する際にはこれを考慮する必要があり、ここでは 5.5mm となっています。高度補正係数を考慮すると、太陽光発電回路の基礎絶縁に必要な空間距離 6.3mm ($\approx 5.5\text{mm} \cdot 1.14$) になります。

グリッド回路

230Vac のグリッドシステム電圧と過電圧カテゴリ 3 は、4000V のインパルス電圧に相当します。過電圧カテゴリ 2 の 1500Vdc の太陽光発電システム電圧は、変圧器によってグリッド回路の過電圧カテゴリ 1 に下げられ、これも 4000V のインパルス電圧を意味します。4000V インパルス電圧の場合、空間距離は 3mm です。高度補正係数を考慮すると、グリッド回路の基礎絶縁の空間距離は 3.5mm ($\approx 3\text{mm} \cdot 1.14$) です。

表 14: EN62109-1 による太陽光発電とグリッド回路の空間距離の決定

	太陽光発電回路	グリッド回路
システム電圧	1500V _{dc}	230V _{rms}
過電圧カテゴリ	2	3
発生するインパルス電圧	6000V	4000V
変圧器による他の回路の過電圧カテゴリの低減	2	1
他の回路の発生するインパルス電圧	2500V	4000V
関連するインパルス電圧	6000V	4000V
基礎絶縁の空間距離 (EN62109-1、表 13)	5.5mm	3.0mm
ここでは高度補正係数 1.14 を考慮した基礎絶縁の空間距離	6.3mm	3.5mm
保護分離の空間距離	8mm	5.5mm
高度補正係数を考慮した保護分離の空間距離	9.2mm	6.3mm

7.2.3 保護分離として使用される空間距離

システム電圧、過電圧カテゴリ、および結果として生じるインパルス電圧の決定は、基本絶縁の場合と同じです。保護分離では、障害がユーザーにとって致命的となる可能性がある為、必要な空間距離は基本絶縁よりも高くなります。表の次に高い値に対応するインパルス電圧は、強化絶縁によって実現される保護分離に使用する必要があります(EN62109-1、7.3.7.4.1)。従って、関連するインパルス電圧は、太陽光発電回路の場合は 8000V、グリッド回路の場合は 6000V です(基本絶縁の場合は 6000V と 4000V ではなく)。太陽光発電回路の空間距離は 8mm、グリッド回路の空間距離は 5.5mm です(EN62109-1、表 13)。高度補正係数を考慮すると、強化絶縁に必要な空間距離は、太陽光発電回路の場合は 9.2mm(≈8mm · 1.14)、グリッド回路の場合は 6.3mm(≈5.5mm · 1.14)です。これらの距離は、入力端子、出力端子、DC リンクまたは IGBT ゲートなどの電力回路と、顧客インターフェイスや電流センサーフィードバックなどのソーラーコントローラーエレクトロニクス間のすべての空間距離に対して考慮する必要があります。

7.3 沿面距離

ポッティング材またはコーティング材は、汚染から保護する為に PCB に使用されることがありますが、保護の下の部品の微小環境も改善します(EN62109-1、7.3.7.6)。間隔要件の削減を目的として、実効汚染度を下げる為にコーティングを使用する場合、それは「コンフォーマルコーティング」と呼ばれ、コーティングされた領域には汚染度 1 が適用されます。ポッティングまたはコーティング材料は、EN60664-3 に従った試験に合格する必要があります。

議論されている太陽光発電コンバータの場合、汚染から保護する為にポッティング材やコーティング材は使用されていないと想定されています。

ここで検討する太陽光発電コンバータは PCB のみで構成されており、その他の絶縁関連コンポーネントは使用されていません。EN62109-1 の列 3、表 14 は、1250V までの電圧の沿面距離に関連します。絶縁の絶縁カテゴリは、高電圧(ここでは PCB 材料の CTI が 350 と想定される為、列 7 が採用されます)または PCB 以外の絶縁体(DC+ と DC-間の箔など)の場合は、列 5 から 8 までの沿面距離を取得して考慮されます。すべての沿面距離について、補間が明示的に許可されています。

変圧器の一次電圧と二次電圧の間のシフトは不明ですが、RMS 電圧を追加して考慮する必要があります。これが、最悪のケースを考慮し、電圧の 2 乗和を使用する理由です。

7.3.1 機能絶縁として使用される沿面距離

L1、L2、L3 相間のグリッド電圧 400V は、変圧器によって 2:1 の比率で降圧されます。従って、L1'、L2'、L3'相間の電圧は 200V です。

$$V_{L1',L2'} = V_{L2',L3'} = V_{L1',L3'} = 200V$$

太陽光発電コンバータに負荷がかかっていない場合、DC リンクは最大太陽光発電電圧にさらされます。この場合、V_{DC+}、DC- = 1500V です。ソーラーコントローラーは、合計 DC 電圧が上部 (DC+とNの間)と下部(NとDC-の間)の DC リンク間で適切に分担されるようにします。したがって、最大印加電圧はここでは 750V です。

$$V_{DC+N} = V_{DC-,N} = 750V$$

モジュールの個々の IGBT とダイオードにかかる電圧は、コンバータの変調指数 M に依存する電圧デューティサイクルによって計算できます[9]。電圧と電流波形間の位相シフト φ は、電圧デューティサイクルにも変調指数にも影響しません。

$$M = \frac{\text{peak voltage between the phases}}{0,5 \cdot V_{dc}} = \frac{V_{L',L'} \cdot \sqrt{2}}{0,5 \cdot V_{dc}} = \frac{200V \cdot \sqrt{2}}{0,5 \cdot 1500V} = 0.377$$

外側の IGBT の電圧デューティサイクルは $1 - \frac{M}{\pi} = 1 - \frac{0.377}{\pi} = 0.88$ 。内部の IGBT と中央のダイオードでは $\frac{M}{\pi} = \frac{0.377}{\pi} = 0.12$ 。

$$V_{DC+,L'upper} = V_{DC-,L'lower} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\left(1 - \frac{M}{\pi}\right) \cdot 0.5 \cdot V_{dc} \right)^2 dt} = \left(1 - \frac{M}{\pi}\right) \cdot 0.5 \cdot V_{dc} = 0.88 \cdot 0.5 \cdot 1500V = 660V$$

$$V_{L1',L1'upper} = V_{L1',L1'lower} = V_{N,L'upper} = V_{N,L'lower} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{M}{\pi} \cdot 0.5 \cdot V_{dc} \right)^2 dt} = \frac{M}{\pi} \cdot 0.5 \cdot V_{dc} = 0.12 \cdot 0.5 \cdot 1500V = 90V$$

その他のすべての電圧は次のように計算できます。

$$V_{L',DC+} = V_{DC+,L'upper} + V_{L1',L1'upper} = 660V + 90V = 750V$$

$$V_{DC+,L'lower} = V_{DC-,L'upper} = V_{dc} - V_{DC+,L'upper} = 1500V - 660V = 840V$$

$$V_{L1'upper,L1'lower} = V_{L2'upper,L2'lower} = V_{L3'upper,L3'lower} = V_{L1',L1'upper} + V_{L1',L1'lower} = 90V + 90V = 180V$$

$$V_{L1'upper,L2'upper} = V_{L1'lower,L2'lower} = \frac{V_{DC+,L'upper}}{V_{L',DC+}} \cdot V_{L',L'} = \frac{660V}{750V} \cdot 200V = 176V$$

$$V_{L1',L2'upper} = V_{L1',L2'lower} = \sqrt{V_{L1',L2'}^2 + V_{L1',L1'lower}^2} = \sqrt{200V^2 + 90V^2} = 219V$$

$$V_{L1'upper,L2'lower} = \sqrt{V_{L1'upper,L2'upper}^2 + V_{L1'upper,L1'lower}^2} = \sqrt{176V^2 + 180V^2} = 252V$$

$$V_{L1',N} = \sqrt{V_{N,L'upper}^2 + V_{L1',L1'upper}^2} = \sqrt{90V^2 + 90V^2} = 128V$$

この例では、DC 電位は接地抵抗器を介してアースに接続されています。従って、アースへの電圧は次のようになります。

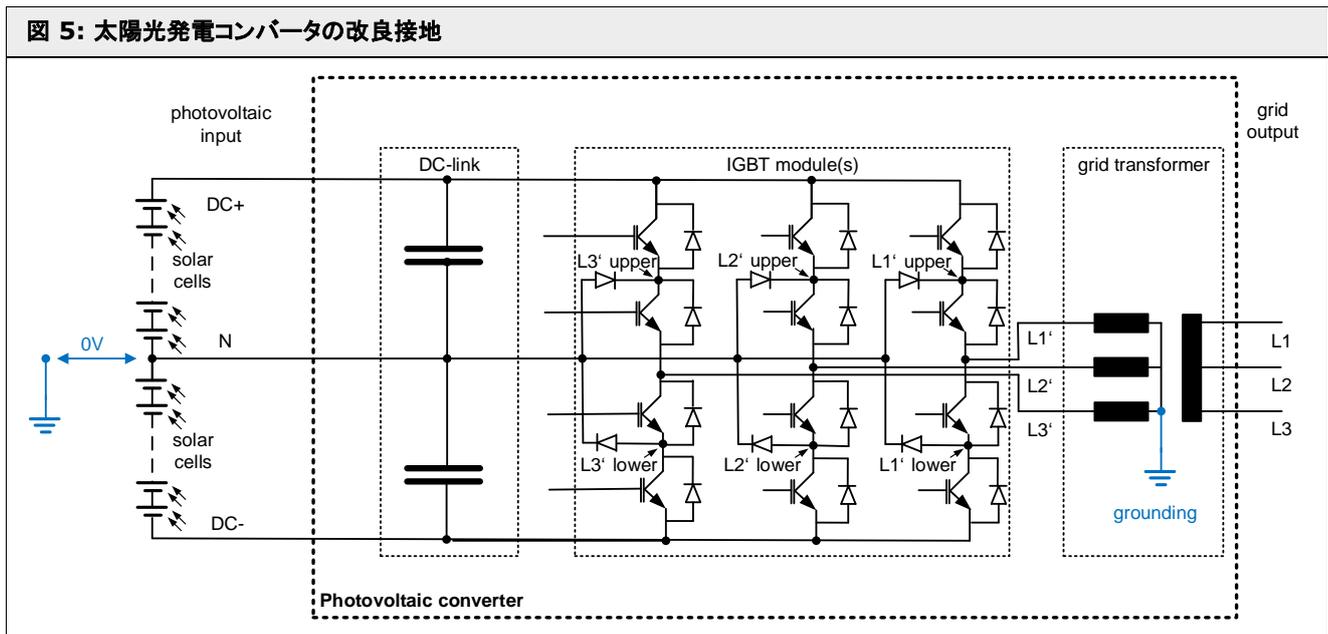
$$V_{DC-,earth} = 0V$$

$$V_{N,earth} = V_{DC-,earth} + V_{DC-,N} = 0V + 750V = 750V$$

$$V_{DC+,earth} = V_{DC-,earth} + V_{dc} = 0V + 1500V = 1500V$$

二次相 L1'、L2'、L3'からアースされた DC-への電圧を計算するには、理解を深める為に修正された等価回路図を使用するのが合理的です。そこでは、DC-は抵抗器でアースに接続されていません。代わりに、グリッド変圧器のスターポイントが接地されます。この変更された回路は、以前の AC ドライブの例で説明したものとほぼ同じです。その場合、DC+または DC-からアースへの電圧は DC 電圧の半分になります。従って、DC 中間点からアースへの電圧は 0V です。

図 5: 太陽光発電コンバータの改良接地



つまり、変圧器のスターポイントまたは DC 中点がアースに接続されている場合も同じです。変圧器が浮いていて、DC-がアースに接続されている場合、変圧器のスターポイントからアースまでの電圧は、DC リンク電圧の半分にになります。これを知ること、太陽光発電回路からアースまでの電圧を簡単に計算できます。

$$V_{L,DC-} = V_{L,earth} = 400V / \sqrt{3} = 230V$$

$$V_{L,DC+} = V_{L,earth} + V_{dc} = 230V + 1500V = 1730V$$

$$V_{L,N} = V_{L,earth} + 0.5 \cdot V_{dc} = 230V + 0.5 \cdot 1500V = 980V$$

変圧器の入力電圧と出力電圧は、(変圧器ベクトルグループの数値インデックスに応じて)任意に位相シフトできることを考慮する必要があります。

$$V_{L,L'} = V_{L,DC+} - V_{L',DC+} = 1730V - 750V = 980V$$

$$V_{L,L'upper} = V_{L,DC+} - V_{DC+,L'upper} = 1730V - 660V = 1070V$$

$$V_{L,L'lower} = V_{L,DC-} + V_{DC-,L'lower} = 230V + 660V = 890V$$

沿面距離は、1250V 未満の電圧については EN62109-1 の表 14 の列 3 から取得され、1250V を超える電圧については列 7 から取得されます。表 14 にはすべての電圧レベルが記載されているわけではないので、明示的に許可された補間を使用できます。電圧 $V_{L1,L1'} = 980V$ の場合、沿面距離は次のように計算されます。

$$d_{L1,L1'} = 4mm + \frac{5mm - 4mm}{1000V - 800V} \cdot 180V = 4.9mm$$

表 15: EN62109-1、表 14 に規定される印加 RMS 電圧と関連する沿面距離

		DC+	DC-	N	L1'upp	L2'upp	L3'upp	L1'low	L2'low	L3'low	L1'	L2'	L3'	L1	L2	L3
		印加 RMS 電圧 [V]														
DC+	EN62109-1、表 14 [mm]から計算された沿面距離 (CTI 350 の PCB の場合)		1500	750	660	660	660	840	840	840	750	750	750	1730	1730	1730
DC-		15		750	840	840	840	660	660	660	750	750	750	230	230	230
N		3.8	3.8		90	90	90	90	90	90	128	128	128	980	980	980
L1'upp		3.4	4.2	1.0		176	176	180	252	252	90	219	219	1070	1070	1070
L2'upp		3.4	4.2	1.0	1.0		176	252	180	252	219	90	219	1070	1070	1070
L3'upp		3.4	4.2	1.0	1.0	1.0		252	252	180	219	219	90	1070	1070	1070
L1'low		4.2	3.4	1.0	1.0	3.1	3.1		176	176	90	219	219	890	890	890
L2'low		4.2	3.4	1.0	3.1	1.0	3.1	1.0		176	219	90	219	890	890	890
L3'low		4.2	3.4	1.0	3.1	3.1	1.0	1.0	1.0		219	219	90	890	890	890
L1'		3.8	3.8	3.1	1.0	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1		200	200	980	980	980
L2'		3.8	3.8	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1		200	980	980	980
L3'		3.8	3.8	3.1	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1	1.0	3.1	3.1		980	980	980
L1		17.3	3.1	4.9	5.4	5.4	5.4	4.5	4.5	4.5	4.9	4.9	4.9		400	400
L2		17.3	3.1	4.9	5.4	5.4	5.4	4.5	4.5	4.5	4.9	4.9	4.9	2		400
L3		17.3	3.1	4.9	5.4	5.4	5.4	4.5	4.5	4.5	4.9	4.9	4.9	2	2	

沿面距離は、決定された空間距離以上である必要があります。表 13 の空間距離要件により増加した距離の値は、ここでは青色でマークされています。

7.3.2 基礎絶縁として使用される沿面距離

基礎絶縁に印加される電圧は、接地された DC-による機能絶縁の為に計算されます。空間距離が沿面距離よりも高いかどうかを確認する必要があります。必要に応じて、沿面距離を空間距離レベルまで増加する必要があります。

表 16: 基礎絶縁に適用される RMS 電圧と必要な沿面距離

	L1, L2, L3	L1', L2', L3'	L1'upp, L2'upp, L3'upp	L1'low, L2'low, L3'low	DC+	N	DC-
印加 RMS 電圧 [V]	230	750	840	660	1500	750	0
EN62109-1、表 14 の沿面距離 [mm]	0.9	3.8	4.2	3.4	15	3.8	0
ここで高度補正係数 1.14 を考慮した空間距離を考慮した必要な沿面距離 [mm]	3.5	6.3	6.3	6.3	15	6.3	6.3

7.3.3 保護分離として使用される沿面距離

強化絶縁または二重絶縁によって実現される、保護分離の沿面距離を決定する為の電圧は基本絶縁の場合と同じですが、沿面距離の要件は高くなります。EN62109-1、表 14 の距離は 2 倍にする必要があります(EN62109-1、7.3.7.5.1)。また、空間距離が沿面距離の 2 倍よりも高いかどうかを確認する必要があります。必要に応じて、沿面距離を空間距離レベルまで増加する必要があります。

あります。

表 17: 保護分離の為に印加 RMS 電圧と必要な沿面距離							
	L1, L2, L3	L1', L2', L3'	L1'upp, L2'upp, L3'upp	L1'low, L2'low, L3'low	DC+	N	DC-
印加 RMS 電圧 [V]	230	750	840	660	1500	750	0
EN62109-1、表 14 の二重沿面距離 [mm]	1.7	7.6	8.4	6.7	30	7.6	0
空間距離を考慮した必要な沿面距離 [mm]	6.3	9.2	9.2	9.2	30	9.2	9.2

7.4 固体絶縁

ポッティング材またはコーティング材は、固体絶縁材として PCB 上で使用できます。この場合、ポッティング材またはコーティング材は、EN60664-3 (EN62109-1、7.3.7.8.4.2)に準拠した試験に合格する必要があります。

この例では、太陽光発電コンバータには固体絶縁材としてのポッティング材やコーティング材がないものと想定しています。

多層 PCB の内層の場合、同じ層上の隣接するトラック間の絶縁は、汚染度 1 の沿面距離と空気中の空間距離(上記の要件を参照)として扱うか、固体絶縁(EN62109-1、7.3.7.8.4.1)として扱う必要があります。

7.4.1 機能絶縁材として使用される固体絶縁材

この規格には機能絶縁に関する特別な要件はなく、関連する電圧の決定のみが規定されています(EN62109-1、7.3.7.3 および 7.3.7.8.2.2)。試験は必要ありません。

7.4.2 基礎絶縁材として使用される固体絶縁材

700µm より薄い絶縁材は、PCB の内層の場合のように機械的ストレスを受けないようにする必要があります。固体絶縁材が電圧ストレスに耐えられることを確認する為に、コンポーネントとサブアセンブリに対して 2 つの試験を実行する必要があります。

インパルス耐電圧試験は、EN62109、表 15 に従って型式試験として実施する必要があります。太陽光発電コンバータの試験電圧は、グリッド回路の場合は 4000V(EN62109-1、表 16、列 4、300V は補間が許可されていない為)、太陽光発電回路の場合は 2034V (EN62109-1、表 16、列 2、230V は補間)です。

絶縁耐力試験は、型式試験と定期試験の両方で実施する必要があります(EN62109-1、7.3.7.8.2.1)。試験電圧は、グリッド回路の場合は 1430Vac または 2020Vdc(EN62109-1、表 17、列 2、230V)、太陽光発電回路の場合は 1684Vac または 2434Vdc(EN62109-1、表 18、列 2、1500V)です。

7.4.3 保護分離として使用される固体絶縁体

検討中の太陽光発電コンバータは、太陽光発電回路に対してのみ保護分離されています。PWM 信号用のフォトカプラと IGBT ゲートドライバーの電源用のトランスがあります。これらのコンポーネントはすべて PCB に取り付けられています。層ごとの絶縁体の厚さが 0.2 mm 未満の場合、保護分離には少なくとも 3 つの材料層が必要です。より厚い材料の場合は 2 つの層で十分です(EN62109-1、7.3.7.8.3.2)。保護分離の為に、コンポーネント、サブアセンブリ、および多層 PCB の層に対して 3 つの試験を実行する必要があります。

インパルス耐電圧試験は、型式試験として実施する必要があります。さらに、絶縁体が単層の材料で構成されている場合は、サンプル試験を実施する必要があります(EN62109-1、7.3.7.8.2.1)。インパルス試験電圧は、グリッド回路の場合は 6000V(300V の場合は EN62109-1、表 16、列 5)、太陽光発電回路の場合は 2300V(230V の場合は EN62109-1、表 16、列 3)です。

グリッド回路と太陽光発電回路の型式試験として、絶縁耐力試験を実施する必要があります。グリッド回路の試験電圧は 2860Vac または 4044Vdc(EN62109-1、表 17、列 3、230V)、太陽光発電回路の試験電圧は 2784Vac または 3867Vdc(EN62109-1、表 18、列 3、1500V)です。使用されている IGBT 電源トランスでは、試験電圧が 1684Vac または 2434Vdc(EN62109-1、表 18、列 2、1500V)の太陽光発電回路の定期試験も必要です。

固体絶縁体を通過する700Vpeakを超える電圧および1000V/mmを超える電圧ストレスの場合、型式およびサンプル試験として部分放電試験が必要です(EN62109-1、7.3.7.8.2.1)。定格放電電圧は、絶縁体で分離された各回路の繰り返しピーク電圧の合計です(EN612109-1、表19)。これは、最大太陽光発電電圧(ここでは1500V)とIGBTスイッチングからの過渡電圧(ここでは、過渡過電圧が発生しない最大太陽光発電電圧で負荷電流が厳しく制限される為、50Vのみ)を加えたものです。

最小部分放電消滅電圧は

$V_{PDextinction} = 1.5 \cdot V_{recurring peak} = 1.5 \cdot (1500V + 50V) = 2325V$ 。これは、50Hz または 60Hz の部分放電試験電圧の最小ピーク値です。

7.5 太陽光発電コンバータの概要

標高 3000 メートルの例における EN62109-1 に従った絶縁協調の結果を次の表にまとめます。

表 18: EN62109-1 に準拠した太陽光発電装置の絶縁要件				
EN62109-1		絶縁の種類		
		機能絶縁	基礎絶縁	保護絶縁
絶縁の実現	空間距離	1.0mm ~ 3.1mm	3.5mm および 6.3mm	6.3mm および 9.2mm
	沿面距離	1.0mm ~ 15mm	3.5mm ~ 15mm	6.3mm ~ 30mm
	固体絶縁			
	インパルス耐圧試験電圧	-	2034V ^a および 4000V ^b	2300V ^a および 6000V ^b
	AC または DC 試験電圧	-	1430V _{ac} ^a および 1684V _{ac} ^b	2860V _{ac} ^a および 2784V _{ac} ^b
	部分放電消滅電圧	-	-	2325V _{peak} ^b
^a グリッド回路用		^b 太陽光発電回路用		

図 1: 絶縁の種類	3
図 2: コンバータの絶縁協調の為に選択された規格の構造	7
図 3: ACドライブの基本回路図	9
図 4: 太陽光発電コンバータの基本図	15
図 5: 太陽光発電コンバータの改良接地	20
表 1: EN61800-5-1、4.3.6.1.3 に準拠した過電圧カテゴリ	3
表 2: EN60664-1、表 A2 に基づく高度補正係数	4
表 3: EN61800-5-1、4.3.6.1.2 に準拠した汚染度	4
表 4: EN61800-5-1、4.3.6.5.2 に準拠した比較トラッキング指数(CTI)グループ	5
表 5: 絶縁協調に関する欧州規格の選択	6
表 6: 絶縁協調の為に UL 規格の選択	6
表 7: セミクロンダンフォスが EN61800-5-1 に従って絶縁協調に使用する標準仕様	8
表 8: EN61800-5-1 の機能絶縁に対する適用 RMS 電圧と関連する沿面距離	11
表 9: ACドライブの機能絶縁に必要な RMS 電圧と沿面距離	12
表 10: 基礎絶縁に適用される RMS 電圧と必要な沿面距離	12
表 11: 保護分離の為に印加 RMS 電圧と必要な沿面距離	13
表 12: EN61800-5-1 に準拠した ACドライブの絶縁要件	14
表 13: EN62109-1 に基づく適用される動作電圧、またはインパルス電圧と関連する空間距離	17
表 14: EN62109-1 による太陽光発電とグリッド回路の空間距離の決定	18
表 15: EN62109-1、表 14 に規定される印加 RMS 電圧と関連する沿面距離	21
表 16: 基礎絶縁に適用される RMS 電圧と必要な沿面距離	21
表 17: 保護分離の為に印加 RMS 電圧と必要な沿面距離	22
表 18: EN62109-1 に準拠した太陽光発電装置の絶縁要件	23

記号と用語

記号	用語
hPa	ヘクトパスカル; $1\text{hPa} = 100\text{N} / \text{m}^2 = 100\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}^2$
NPC	中性点クランプ、説明は[9]を参照
V_{isol}	モジュールベースプレートまたは基板の裏面と短絡したモジュール電源回路端子間に、印加される絶縁試験電圧(r.m.s.)。

用語と記号の詳細な説明は「パワー半導体アプリケーションマニュアル」[2]に記載されています。

参考文献

- [1] www.semikron-danfoss.com
- [2] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, "Application Manual Power Semiconductors", 2nd edition, ISLE Verlag 2015, ISBN 978-3-938843-83-3
- [3] EN60664-1: 2022-07, Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests
- [4] EN62477-1: 2017-10, Safety requirements for power electronic converter systems and equipment – Part 1: General
- [5] EN61800-5-1: 2017, Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1: Safety requirements – Electrical, thermal and energy
- [6] EN62109-1: 2011-04, Safety of power converters for use in photovoltaic power systems – Part 1: General requirements
- [7] UL61800-5-1: 2022-06-24, Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1: Safety requirements – Electrical, thermal and energy
- [8] UL62109-1: 2014, Safety of power converters for use in photovoltaic power systems - Part 1: General requirements
- [9] Ingo Staudt, "3L NPC & TNPC Topology", Semikron Danfoss application note, AN 11-001 – rev06, Nuremberg, 2024

重要な情報および警告

本資料に記載されている情報は、製品の特性を保証するものではありません。本資料では、標準的なアプリケーションで期待されるセмикロンダンフォス製品の通常の特徴のみを説明しますが、特定のアプリケーションによっては異なる場合があります。従って、製品は前もってそれぞれのアプリケーションに対して試験する必要があります。この結果、あらゆる種類のアプリケーションの調整が必要になる場合があります。セмикロンダンフォス製品のユーザーは、セмикロンダンフォス製品を組み込んだアプリケーションの安全性について責任を負い、セмикロンダンフォス製品が故障した場合でも、アプリケーションが人身事故、火災、その他の問題を生じさせない様に適切な安全対策を講じる必要があります。ユーザーはアプリケーションの設計および実現が、アプリケーションの範囲に適用される全ての法律、規則、規範、標準に準拠している事を確認する責任を負います。セмикロンダンフォスの認定代表者が署名した書面による、セмикロンダンフォスの明示的な承認がない限り、セмикロンダンフォスの製品は、製品の故障またはその使用による結果が、人身傷害に影響を及ぼす事が合理的に予想されるアプリケーションで使用する事はできません。

ここに記載されている情報の正確性、完全性、および/または使用に関して、いかなる表明または保証も行われず、いかなる責任も負いません。これには、第三者の知的財産権の非侵害の保証が含まれますが、これに限定されません。セмикロンダンフォスは、ユーザーのアプリケーションから生じる可能性がある、自社または第三者の特許権、著作権、企業秘密、その他の知的財産権を侵害していない事についていかなる表明も保証も行いません。本資料は、同等の内容および範囲を有する以前の全てのセмикロンダンフォスの情報に優先し、置き換えます。セмикロンダンフォスは、いつでも本文書を更新/または改訂する事があります。

Semikron Danfoss International GmbH
Sigmundstrasse 200, 90431 Nuremberg, Germany
Tel: +49 911 65596663
sales@semikron-danfoss.com, www.semikron-danfoss.com