

## Application Note

# 単相系統連系インバータ上の単独運転防止機能の実装

---



Vedatroyee Ghosh, Harald Parzhuber

## 目次

|                            |   |
|----------------------------|---|
| 1 概要.....                  | 2 |
| 2 検出方式.....                | 3 |
| 3 IEC 62116 のテスト設定と手順..... | 7 |
| 4 まとめ.....                 | 9 |
| 5 参考資料.....                | 9 |

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 概要

アイランディングとは、負荷と発電の両方からなるエリア電力系統 (エリア EPS) の一部が、主系統から電氣的に分離されたにもかかわらず、分散型エネルギー リソース (DER) がその分離されたセクションに電力を供給し続けている状態を指します。これが意図せず発生した場合、それは意図しない単独運転として知られており、次のような深刻なリスクをもたらします。

- 電力会社の作業員は、通电していないと誤って判断した送電線に接触してしまうおそれがある
- 電圧または周波数が制御されていないため、接続されている電気機器に損傷を与える可能性がある
- 電力系統がグリッド コードの規制に違反している

そのため、DER が単独運転の状態を認識・検出し、速やかに系統から切り離すことができるよう、単独運転防止機能が実装されており、作業員の安全確保、機器の保護、グリッド コードへの準拠が図られています。システム レベルでの DER 接続のブロック図を図 1-1 に示します。

DER には、可能なすべての負荷ケースに対して単独運転を検出し、非検出ゾーン (NDZ) を最小化または排除する機能を装備することが不可欠です。NDZ とは、単独運転検出方式が単独運転事象を識別できないあらゆる負荷条件の範囲と定義できます。

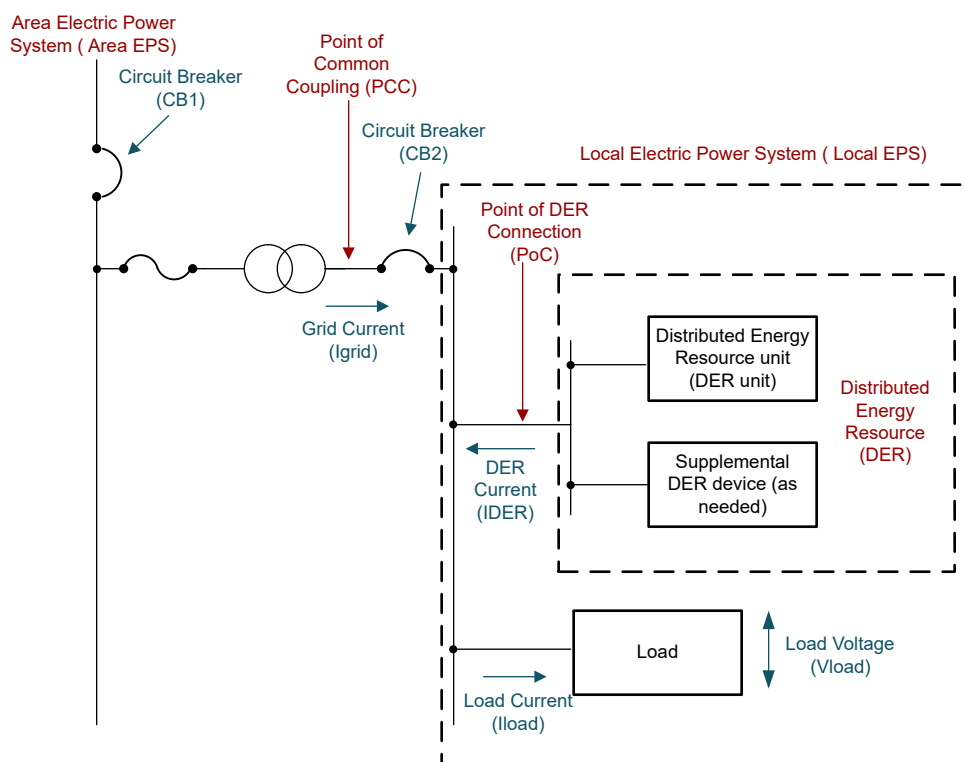


図 1-1. 単独運転防止機能を示す DER 相互接続のブロック図

IEEE 1547、IEC 62116、VDE-AR-N-4105 を含むいくつかの国際規格では、系統連系システムに対する単独運転防止試験の要件と範囲が定義されています。この中で、IEC 62116 は PV インバータの単独運転防止性能を評価するために特別に設計された、標準化された再現可能な試験手順を提示しています。この規格からの重要な要件は、単独運転事象を検出したときに、インバータが 2 秒以内に電力網から切断される必要があることです。

## 2 検出方式

単独運転防止試験は、主に受動方式または能動方式に分類できます。受動的な単独運転検出方式は、基本として、1つ以上のシステム パラメータを監視し、設定されたスレッシュホルドと比較します。スレッシュホルドを超えると故障が検出され、システムがシャットダウンします。

### 受動方式

受動方式はよく知られており、主に使用されている理由は、単純で安価であり、電力品質を低下させる可能性のある無効電力の変動や高調波などの外乱を引き起こさないためです。ただし、この方式には非検出ゾーン (NDZ) という問題があります。つまり、いくつかの条件下では、単独運転検出が損なわれる可能性があり、その結果、性能が低下します。

受動方式での検出の一般的な方法を図 2-1 に示します。

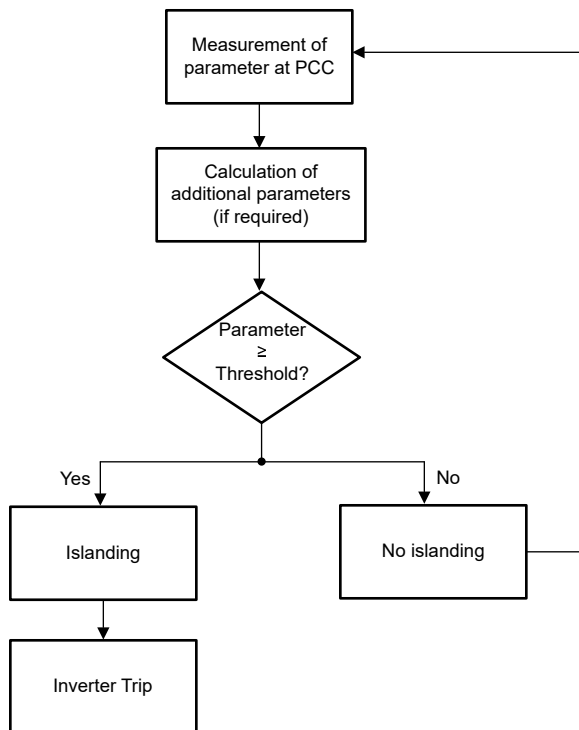


図 2-1. 受動的な単独運転検出方式のフロー図

一般的に使用される受動方式の例をいくつか示します。

- 過電圧 / 低電圧 (OUV)
- 過周波数 / 低周波数 (OUF)
- 出力電力変化率 (RoCoP)
- 電圧変化率 (RoCoV) / 周波数変化率 (RoCoF) / 出力電力に対する周波数変化率 (RoCoFOP)
- 電圧位相跳躍検出
- 電圧または電流の高調波成分

### 能動方式

能動方式は、単独運転を検出するために、特定のインバータ パラメータにわずかな変動を加えることで機能します。電力網につながっている場合、電力網の値が強制的に適用されるため、これらの変動によるシステム パラメータに対する影響は無視できます。ただし、電力網につながっていない場合、影響は顕著になり、最終的に切断につながります。

文献によると、能動方式は受動方式に比べてかなり小さい NDZ を示します。したがって、地域の発電と消費が密接にバランスが取れている場合など、受動方式が失敗する傾向があるシナリオでは、能動方式はより効果的に単独運転を検出

できます。ただし、変動を継続的に導入すると、電力品質やシステム性能の低下につながるおそれがあることに注意することが重要です。

能動方式の一般的な検出方法を図 2-2 に示します。

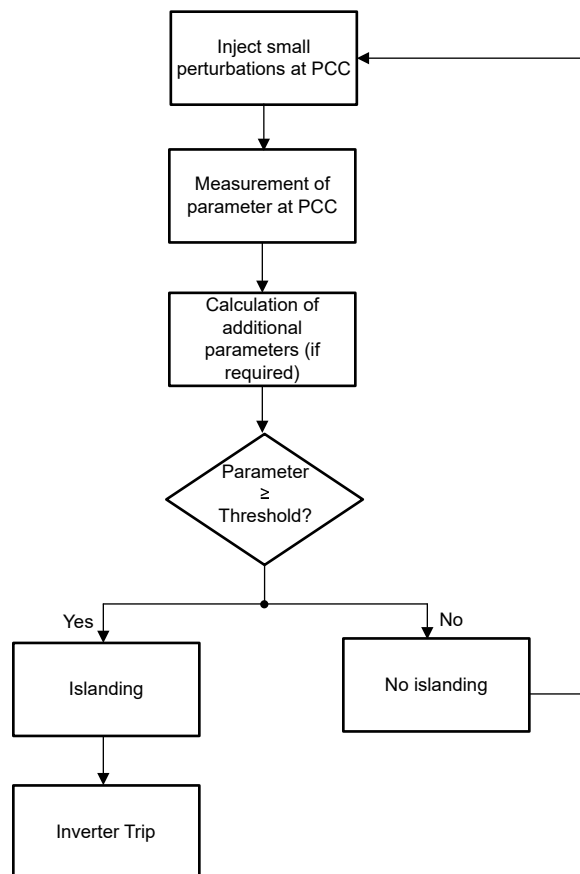


図 2-2. 能動的な単独運転検出方式のフロー図

一般的に使用される能動方式の例をいくつか示します。

- インピーダンスの変化
- アクティブ インピーダンス検出
- スリップ モード周波数シフト (SMS)
- アクティブ周波数ドリフト (AFD)
- サンディア周波数シフト (SFS)
- サンディア電圧シフト (SVS)
- 周波数ジャンプ (FJ)
- 有効電力 / 無効電力の変動

このドキュメントでは、最も広く使用されている 2 つの能動的な単独運転防止方式であるサンディア周波数シフト (SFS) とサンディア電圧シフト (SVS) に焦点を当てています。

### サンディア周波数シフト (SFS)

サンディア周波数シフト (SFS) は、共通接続点 (PCC) 電圧の周波数に正のフィードバックを導入することによって動作する能動的な単独運転防止方式です。通常の系統連系動作では、電力系統は強力な基準として機能し、発生する変動を吸収し、安定した周波数を維持します。ただし、インバータが単独運転状態になると、わずかな周波数偏差でも正のフィードバック ループを介して徐々に増幅され、周波数は過周波数 / 低周波数 (OUF) 保護スレッショルドを超えるまで連続的にドリフトし、切断がトリガされます。

チョッピング周波数  $c_{f0}$  は次の式から計算できます。この式では、 $c_{f0}$  はチョッピング係数、 $k_{SFS}$  はゲイン、 $f_{inv}$  はインバータの出力周波数、 $f_{grid}$  はグリッドの周波数です。

$$c_f = c_{f0} + k_{SFS}(f_{inv} - f_{grid}) \quad (1)$$

- $k_{SFS}$  は、測定した送電網周波数が公称値から逸脱した場合に注入される周波数です
- $C_{f0}$  は一定の周波数バイアス項であり、単独運転の疑いがないでもシステムに注入されるため、非常に小さく保たれています

この方式の制御図を図 2-3 に示します。

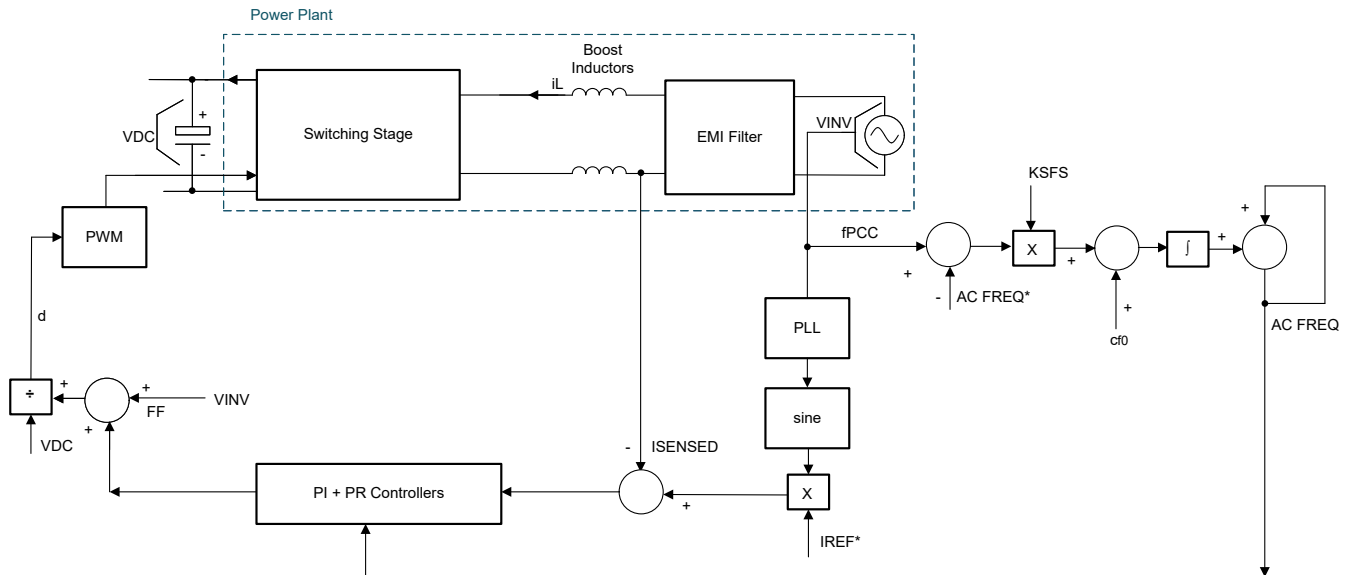


図 2-3. SFS 制御図

## サンディア電圧シフト (SVS)

サンディア電圧シフト (SVS) は、共通接続点 (PCC) での電圧振幅に正のフィードバックを導入する能動的な単独運転防止方式です。通常の系統連系動作中は、送電網電圧は非常に安定化され、SVS メカニズムは大きな変動を発生させません。ただし、送電網が切断された時点で、PCC の電圧は送電網によって安定化されなくなり、小さい電圧偏差は正のフィードバック ループによって増幅されます。その結果、電圧振幅が過電圧 / 低電圧 (OUV) 保護スレッシュホールドを超えて急速にドリフトし、単独運転検出と切断がトリガされます。インバータによる流入電流の変動は、インバータ電圧の変動に正比例していると言えます。

$$I_{ref-dis} = k_{SVS}(V_e) \quad (2)$$

ここで、 $I_{ref-dis}$  は切断リファレンス電流、 $k_{SVS}$  はアルゴリズムの応答時間を調整するためのゲイン、 $V_e$  は電圧誤差の変動です

- 次に、 $I_{ref-dis}$  がインバータの電流リファレンスに追加されます

この方式の制御図を図 2-4 に示します。

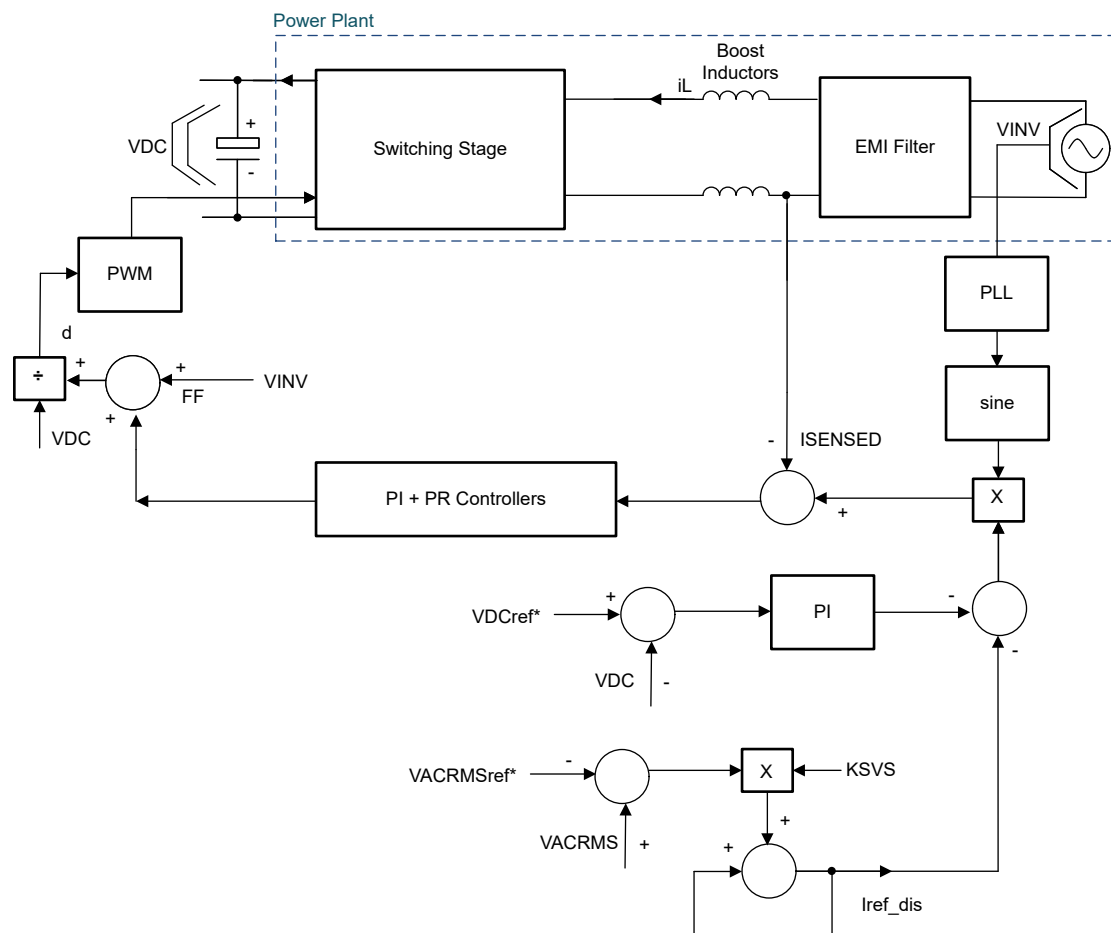


图 2-4. SVS 制御図

この方式は **NDZ** を小さくできますが、特定の動作条件下では電力品質が低下する可能性があります。しかし、サンディア周波数シフト方式と効果的に組み合わせることができ、この 2 つの方式を組み合わせることで、単独運転防止検出性能が大幅に向上することが実証されています。

### 3 IEC 62116 のテスト設定と手順

「系統連系形太陽光発電インバータ – 単独運転防止方式の試験手順」と題された IEC 62116 では、太陽光発電 (PV) インバータの単独運転防止性能を評価するための標準化された再現可能な手順を定義しています。IEC 62116 の要件を満たす機器は、単独運転防止機器に分類できます。つまり、単独運転状態を検出し、該当するすべての動作条件で電力網への給電を即座に停止できます。このセクションでは、規格で定められたテスト設定および試験方法について説明します。

#### テスト回路および部品

IEC 62116 テスト回路は、電力の流れと負荷バランスを精密に制御することで、実際の系統条件をシミュレーションします。この主な目標は、単独運転防止検出のワーストケース シナリオ、つまりインバータの出力が接続負荷とほぼ一致しているケースを再現することです。

主要部品:

- EUT (被試験機器): DC ソースと系統を表す AC ソースとの間に接続された PV インバータ (通常)
- 調整可能な RLC 負荷ネットワーク: AC 側で並列に接続されており、負荷分散を微調整可能
- 電圧、電流、電力の流れをリアルタイムで監視する測定装置

TIDA-010938 を使用したテスト設定の例を図 3-1 に示します。

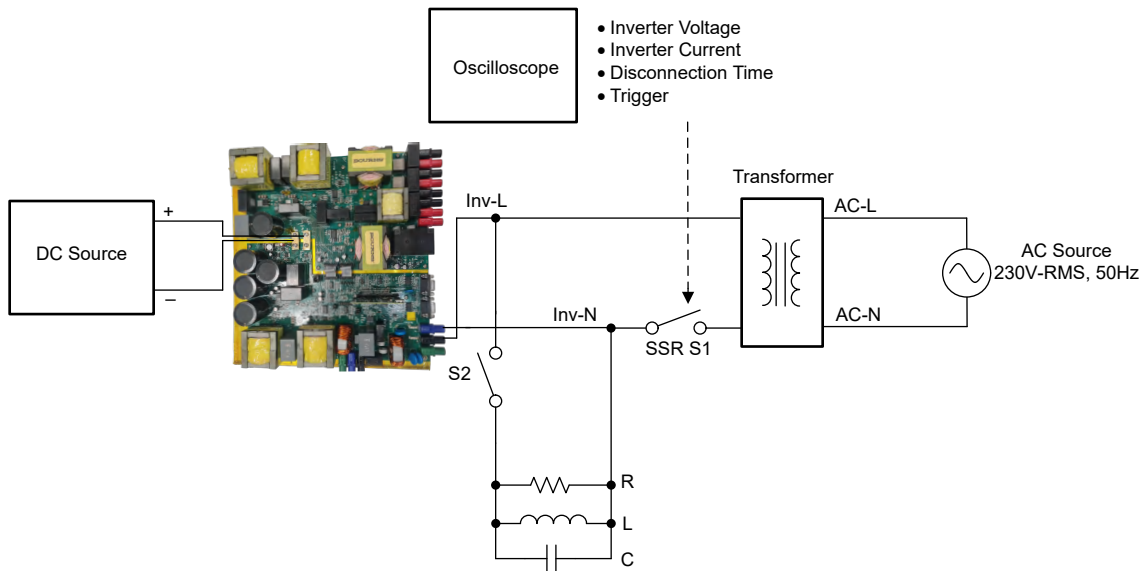


図 3-1. TIDA-010938 の単独運転防止試験

設定によって可能になること:

- 平衡および不均衡な電力状態のシミュレーション
- 制御された電力網の切り替え (電力網の切断をシミュレート)
- インバータの単独運転検出応答時間の監視

#### テスト方法

IEC 62116 は、以下の 3 種類の出力電力条件にわたって、PV インバータの単独運転防止性能を評価するための標準化された方法を規定しています。

- 条件 A: 最高出力周
- 条件 B: 最大値の 50 ~ 66%
- 条件 C: 最大値の 25 ~ 33%

詳細については、表 3-1 を参照してください。

**表 3-1. 試験条件**

| 試験 | インバータ出力電力    | インバータ入力電圧 (VDC) | シャットダウン設定           |
|----|--------------|-----------------|---------------------|
| A  | 公称           | > 90% 公称値       | V および f シャットダウンの公称値 |
| B  | 50 ~ 66% 公称値 | 50% 公称値、±10%    | V および f シャットダウンの公称値 |
| C  | 25 ~ 33% 公称値 | <10% 公称値        | V および f シャットダウンの公称値 |

- この試験では、 $Q_f = 1.0 \pm 0.05$  の品質係数に調整された RLC 負荷を使用して、平衡状態にあるワーストケースの単独運転をシミュレートしています。この負荷は、電力網スイッチ  $S_1$  を流れる電流が **0A (±1% 定格電流)** になるように平衡化されており、つまりインバータ出力とローカル負荷との間の電力が完全に一致しています。単独運転試験は  $S_1$  を開くことでトリガされ、インバータの出力電流がゼロになるまで、動作オン時間が記録されます。
- 次に、規格で定義されている試験条件に負荷の不均衡が適用されます。これには、有効負荷および / または 1 つの反応成分 (L または C のいずれか) の変化が含まれます。試験は調整後に繰り返され、動作オン時間が記録されます。試験 A、B、C の電力不平衡の試験条件に関する詳細については、[IEC-62116 規格](#)を参照してください。
- 合格 / 不合格基準: すべての試験条件で、動作オン時間が **2 秒未満**である必要があります。

要求の厳しい動作条件での単独運転防止性能を評価するために、TIDA-010938 は、試験 A、B、C について IEC 62116 が定義しているワーストケース シナリオに対して試験を行い、負荷の不均衡は適用しませんでした。[設計ガイド](#)に、詳細な試験結果と解析を掲載しています。

## 4 まとめ

単相系統連系インバータシステムにとって、単独運転防止機能は重要な安全性要件です。電力網が切断された場合、インバータはその状態を迅速に検出し、ローカル負荷への電力供給を停止する必要があります。停止しない場合、作業員、機器、電力網の完全性に大きなリスクをもたらします。受動と能動の両方の単独運転防止方式が存在し、それぞれに単純さと検出信頼性との間に明確なトレードオフがあります。能動方式、特にサンディア周波数シフト (SFS) とサンディア電圧シフト (SVS) は、PCC で正のフィードバック メカニズムを利用してシステム パラメータを保護スレッショルドの範囲外に駆動することで優れた性能を発揮し、非検出ゾーンを大幅に削減します。IEC 62116 に準拠して実施される試験は、これらの方式を検証するための標準化された再現可能なフレームワークを提供し、ワーストケース条件をシミュレートし、電力網の損失から 2 秒以内に切断する必要があります。必要な性能目標に応じて、適切な単独運転防止方式を選択することで、安全な系統連系インバータシステムの設計において、慎重な方式選択と包括的な準拠試験を確実に行うことができます。

## 5 参考資料

- テキサス インスツルメンツ、『TIDA-010938 リファレンス デザイン』Web ページ。
- MDPI、『マイクログリッドに対する単独運転検出方式の調査とグリッド コードとの比較における非検出ゾーンの評価』Web ページ。
- IEEE、『1547-2018 — 関連する電力システム インターフェイスとの分散エネルギー リソースの相互接続と相互運用性に関する IEEE 規格 | IEEE Standard | IEEE Xplore』Web ページ。
- IEEE、『IEC 62116 に準拠した単独運転防止機能の試験：実験的実現可能性評価 | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore』Web ページ。
- IEEE、『NBR-IEC 62116 規格に準拠した単相の単独運転防止解析プラットフォームの開発』Web ページ。

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](https://www.ti.com) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月