

Application Note

单相并网逆变器的防孤岛实现方案



Vedatroyee Ghosh, Harald Parzhuber

	内容	
1 简介.....		2
2 检测方法.....		3
3 IEC 62116 测试设置和程序.....		7
4 总结.....		9
5 参考资料.....		9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

孤岛是指区域电力系统 (Area EPS) 中包含负荷和发电的部分与主电网电气隔离，但分布式能源 (DER) 仍继续向该孤立部分供电的状态。当这种情况意外发生时，即称为非有意孤岛，它会带来严重风险，例如：

- 电网线路作业人员可能会接触到他们以为已断电的带电线路
- 连接的电气设备可能因电压或频率失控而损坏
- 系统不再符合电网规范要求

因此，需要实施防孤岛保护，使 DER 能够识别和检测孤岛状态并迅速断开连接，以保障人员安全、保护设备并确保符合电网规范。系统级 DER 连接的方框图如图 1-1 所示。

必须使 DER 具备在所有可能负载情况下检测孤岛的能力，从而最大限度地缩小或消除非检测区 (NDZ)。NDZ 可定义为孤岛检测方法无法识别孤岛事件的任何负载条件范围。

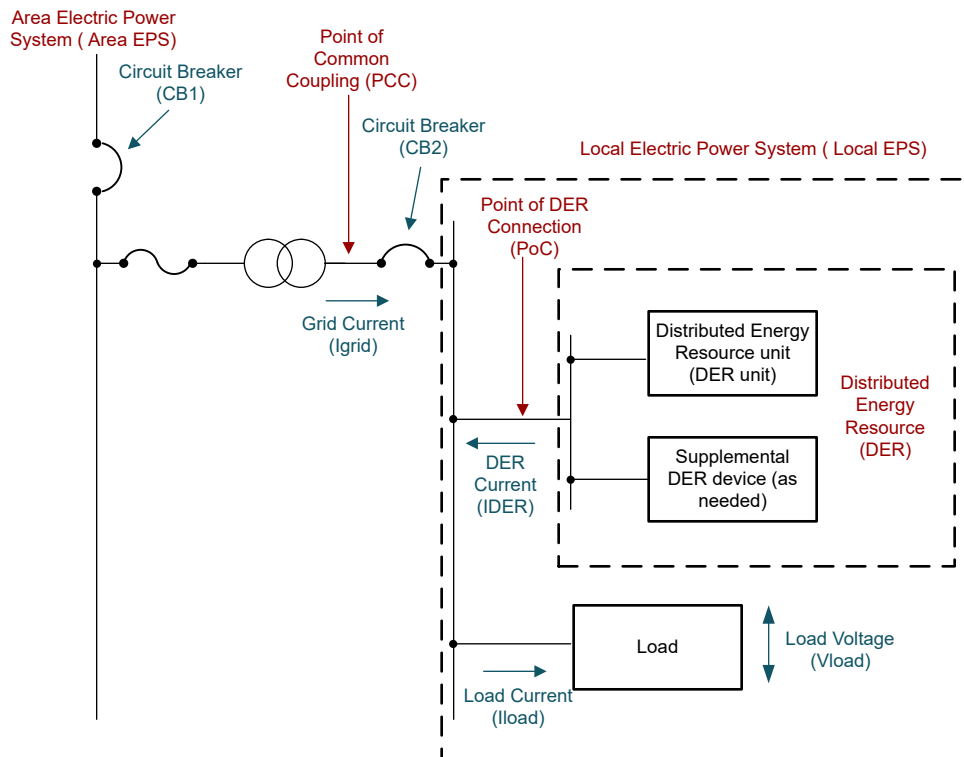


图 1-1. 演示防孤岛 DER 互连方框图

包括 IEEE 1547、IEC 62116 和 VDE-AR-N-4105 在内的多项国际标准规定了并网系统防孤岛测试的要求和范围。其中，IEC 62116 提供了一种标准化且可重复的测试程序，专门用于评估 PV 逆变器的防孤岛性能。该标准的一项关键要求是，在检测到孤岛事件后，逆变器必须在 2 秒内断开与电网的连接。

2 检测方法

防孤岛测试主要可分为被动和主动方法。被动孤岛检测方法监测一个或多个系统参数，并将其与设定阈值进行比较。如果超过阈值，则判定发生故障并关断系统。

被动方法

被动方法广为人知并被大量使用，因为其简单、成本低，且不会引入无功功率变化或谐波等可能降低电能质量的扰动。然而，这类方法存在非检测区 (NDZ)，这意味着在某些工况下孤岛检测可能失效，从而降低其性能。

被动方法的通用检测方案如 图 2-1 所示。

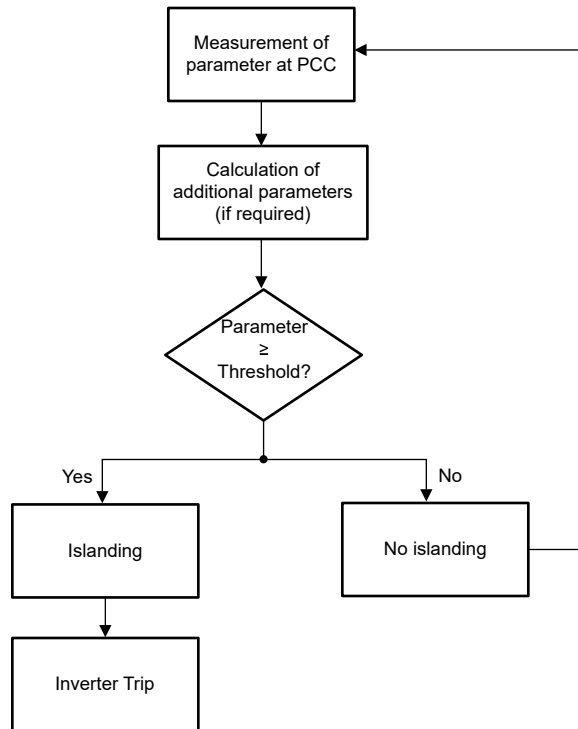


图 2-1. 被动防孤岛方法的流程图

一些常用的被动方法包括：

- 过/欠压 (OUV)
- 过/欠频率 (OUF)
- 输出功率变化率 (RoCoP)
- 电压变化率 (RoCoV)/频率变化率 (RoCoF)/频率对输出功率变化率 (RoCoFOP)
- 电压相位跃变检测
- 电压或电流谐波含量

主动方法

主动方法通过对逆变器的某些参数引入小扰动来检测孤岛。当电网存在时，由于电网强制维持自身参数值，这些扰动对系统参数的影响可以忽略不计。然而，一旦电网断开，这种扰动的影响就会变得显著，最终导致逆变器断开连接。

根据文献，与被动方法相比，主动方法的 NDZ 显著更小。因此在被动方法容易失效的场景（例如本地发电与用电紧密平衡时），主动方法能更有效地检测到孤岛。但需注意，持续引入扰动可能会导致电能质量和系统性能有所下降。

主动方法的通用检测方案如 图 2-2 所示。

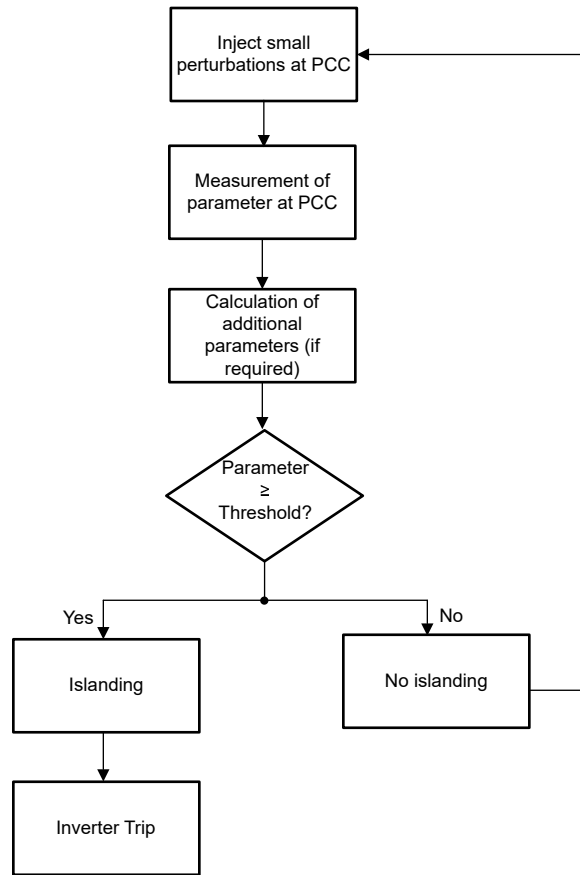


图 2-2. 主动防孤岛方法的流程图

一些常用的主动方法包括：

- 阻抗变化
- 有源阻抗检测
- 滑模频率偏移 (SMS)
- 有源频率漂移 (AFD)
- 桑迪亚频率偏移 (SFS)
- 桑迪亚电压偏移 (SVS)
- 频率跃变 (FJ)
- 有功功率/无功功率变化

本文重点介绍两种应用最广泛的主动防孤岛方法：桑迪亚频率偏移 (SFS) 和桑迪亚电压偏移 (SVS)。

桑迪亚频率偏移 (SFS)

桑迪亚频率偏移 (SFS) 是一种主动防孤岛方法，其工作原理是在公共耦合点 (PCC) 电压的频率中引入正反馈。在正常并网运行期间，公用电网作为强基准，吸收所有引入的扰动，从而维持频率稳定。但当逆变器进入孤岛状态后，即便是微小的频率偏差也会通过正反馈环路逐步放大，使频率持续漂移，直到超出过/欠频率 (OUF) 保护阈值，触发断开连接。

斩波频率 c_{f0} 可通过下一个表达式计算得出，其中 c_{f0} 是斩波系数、 k_{SFS} 是增益、 f_{inv} 是逆变器的输出频率、 f_{grid} 是电网的频率：

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

- K_{SFS} 是当测得的电网频率偏离标称值时注入的频率
- C_{f0} 是一个恒定的频率偏置项，即使在未检测到孤岛风险时也会注入系统，因此它被设定得非常小

[illegible]

图 2-3. SFS 控制图

桑迪亚电压偏移 (SVS) 是一种主动防孤岛方法, 它在公共耦合点 (PCC) 的电压幅值上引入正反馈。在正常并网运行期间, 电网电压受到严格调节, SVS 机制几乎不产生明显扰动。但在电网断开后, PCC 处的电压不再受电网调节, 任何微小的电压偏差都会通过正反馈环路放大。这导致电压幅值迅速漂移到过/欠压 (OUV) 保护阈值之外, 从而触发孤岛检测和断开。可以认为, 逆变器注入电流的变化与逆变器电压的变化成正比

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

- 随后， $I_{ref-djs}$ 被叠加到逆变器的电流基准上

图 2-4 展示了该方法的控制图。

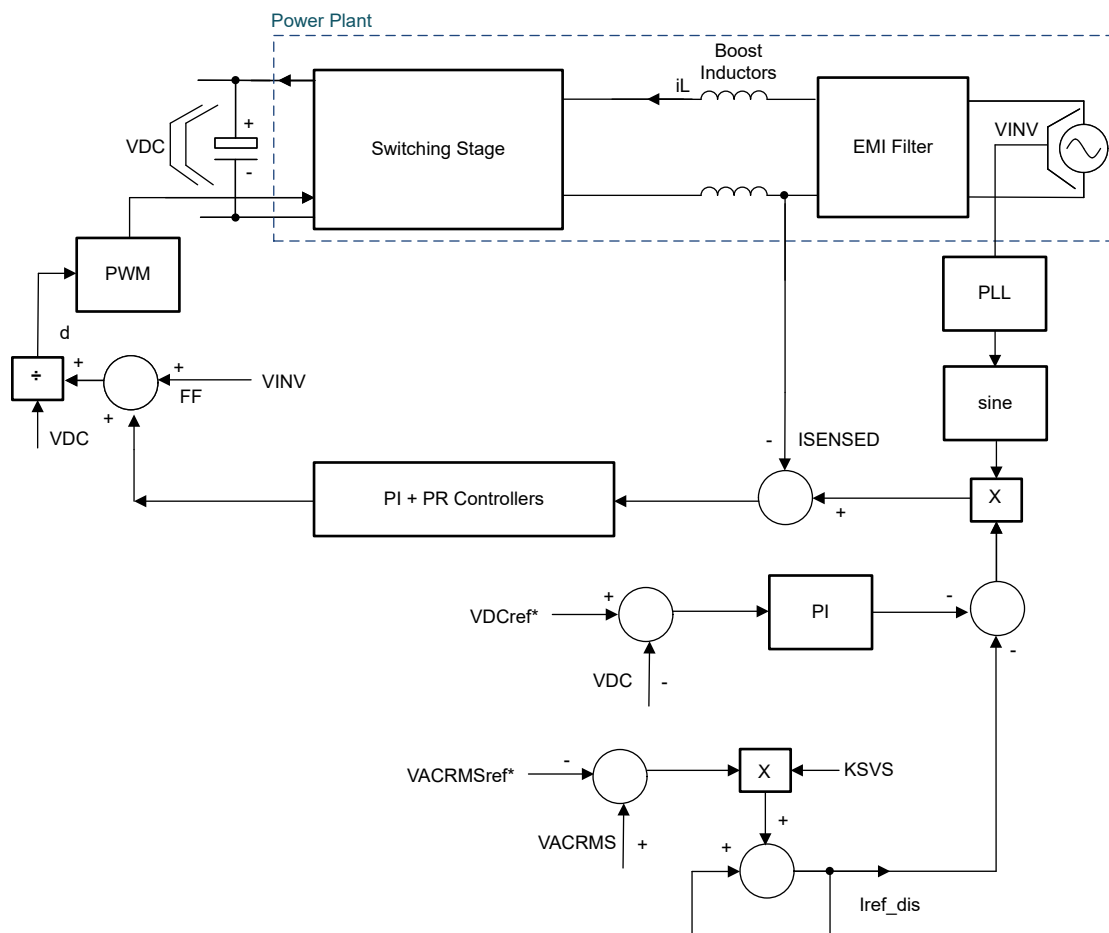


图 2-4. SVS 控制图

尽管这种方法实现了很小的 **NDZ**，但在某些运行条件下可能会降低电能质量。不过，它可以与桑迪亚频率偏移法有效结合，两种方法共同使用时，能显著提升防孤岛检测性能。

3 IEC 62116 测试设置和程序

IEC 62116 “并网光伏逆变器 - 防孤岛保护措施测试程序”为评估光伏 (PV) 逆变器的防孤岛性能制定了一套标准化且可重复的程序。满足 IEC 62116 要求的设备可归类为非孤岛型设备，意味着它能够在所有适用运行条件下检测到孤岛状态并立即停止向电网供电。本节介绍了该标准规定的测试设置与方法。

测试电路与元件

IEC 62116 测试电路通过对功率流和负载平衡的精确控制，模拟实际电网状况。其主要目标是复现防孤岛检测的最恶劣情况，即逆变器输出与所连接负载紧密匹配。

主要元件：

- 受测设备 (EUT)：通常为 PV 逆变器，连接在直流源与代表电网的交流源之间
- 可调 RLC 负载网络：并联在交流侧，可进行精细的负载平衡调节
- 实时监测电压、电流和功率流的测量仪器

图 3-1 中显示了一个使用 TIDA-010938 的测试设置示例。

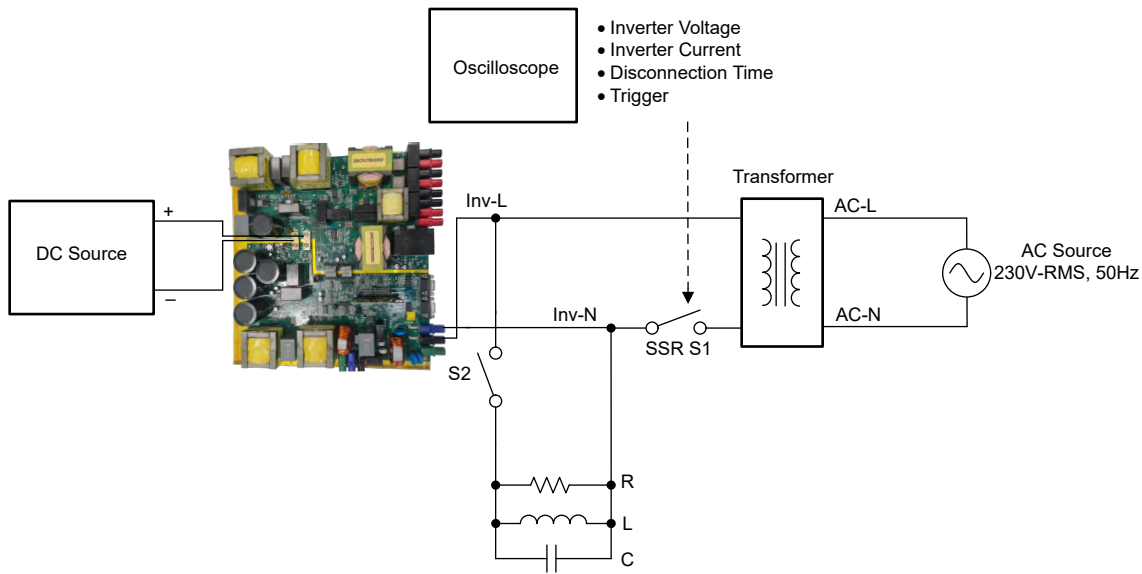


图 3-1. TIDA-010938 的防孤岛测试

该设置能够实现：

- 平衡与不平衡功率状态的模拟
- 受控的电网开关操作（模拟电网断开）
- 对逆变器孤岛检测响应时间的监测

测试程序

IEC 62116 提供了一种标准化方法，用于评估 PV 逆变器在三种输出功率条件下的防孤岛性能：

- 条件 A：最大输出
- 条件 B：最大值的 50 - 66%
- 条件 C：最大值的 25 - 33%

表 3-1 显示了这种情况。

表 3-1. 试验条件

试验	逆变器输出功率	逆变器输入电压 (VDC)	关断设置
A	标称值	高于标称值的 90%	标称关断电压和频率
B	标称值的 50-66%	标称值的 50%, +/-10%	标称关断电压和频率
C	标称值的 25-33%	低于标称值的 10%	标称关断电压和频率

- 测试使用调谐至品质因数 $Q_f = 1.0 \pm 0.05$ 的 RLC 负载，模拟最恶劣的平衡孤岛情况。负载经过平衡，使流过电网开关 S_1 的电流为 0A (额定电流的 $\pm 1\%$)，代表逆变器输出与本地负载之间实现完美的功率匹配。通过断开 S_1 触发孤岛测试，并记录直到逆变器输出电流为零的继续运行时间。
- 随后，根据标准规定的测试条件施加负载不平衡。包括改变有功负载和/或一个无功元件 (L 或 C)；每次调整后重复测试，并记录继续运行时间。有关试验 A、B 和 C 功率不平衡测试条件的详细信息，请参阅 [IEC 62116 标准](#)。
- 合格/不合格判据：所有受测条件下的继续运行时间 ≤ 2 秒。

为评估 TIDA-010938 在严苛运行条件下的防孤岛性能，针对 IEC 62116 规定的试验 A、B、C 最恶劣情况，在无负载不平衡的条件下进行了测试。[设计指南](#)中提供了详细的测试结果和分析。

4 总结

防孤岛保护是单相并网逆变器系统的关键安全要求。当公用电网断开时，逆变器必须迅速检测到这一状况并停止向本地负载供电，否则将对人员、设备和电网完整性构成严重风险。防孤岛方法分为被动和主动两类，二者在简单性和检测可靠性之间各有取舍。主动方法，特别是桑迪亚频率偏移 (SFS) 和桑迪亚电压偏移 (SVS)，通过在 PCC 引入正反馈机制，将系统参数推向保护阈值之外，从而显著缩小非检测区，性能更为优越。按照 IEC 62116 进行的测试为验证这些方法提供了一个标准化且可重复的框架，该测试模拟最恶劣工况，并要求在电网断电后 2 秒内断开连接。根据所需的性能目标，可选择合适的防孤岛方法，从而确保在设计中审慎选择方法并进行全面的合规测试，打造出安全、适配电网的逆变器系统。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[TIDA-010938 参考设计](#)，网页。
- MDPI，[A Survey of Islanding Detection Methods for Microgrids and Assessment of Non-Detection Zones in Comparison with Grid Codes](#)，网页。
- IEEE，[1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces | IEEE Standard | IEEE Xplore](#)，网页。
- IEEE，[Test of anti-islanding protections according to IEC 62116: An experimental feasibility assessment | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)，网页。
- IEEE，[Development of a single-phase anti-island analysis platform according to NBR-IEC 62116 standard](#)，网页。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月