

可插拔式光伏系统与现有 电力保护系统的相互影响

目录

引言	03	并网逆变器的触电风险	10	总结	18
了解可插拔式光伏 (PIPV) 系统 与传统光伏系统之间的差异	04	并网逆变器输出电路未进行用户接触及 安全触摸评估	10	附录 A	19
住宅用 PIPV 系统的兴起	05	应对公众触电安全的防护措施	11	PIPV 中的 GFCI 研究测试	19
过流保护	06	PIPV 输出线缆与连接插头的相关风险	12	GFCI 断路器测试	20
		PIPV 输出电路触电保护的潜在解决方案	13	GFCI 插座测试	22
		用于 PIPV 系统中的GFCI接地 故障电路保护	14	附录 B	23
		与PIPV交互导致GFCI接地保护功能丧失 产生的安全风险	15	美国与欧洲的差异	23
		接地保护GFCI如何减少PIPV系统风险	17		

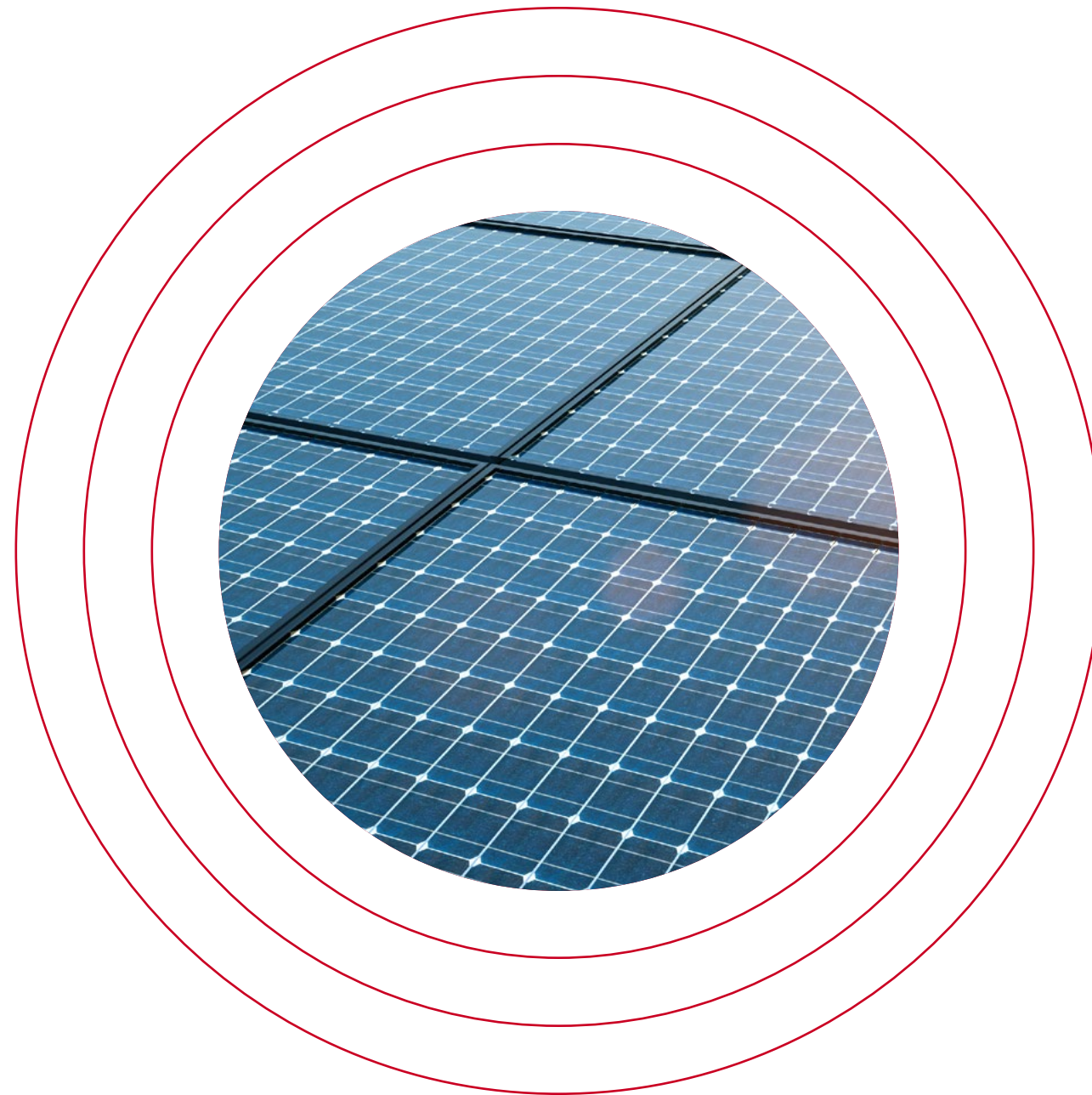
引言

近年来，美国对于可插拔式光伏 (PIPV) 技术的关注日益增长，尤其在住宅应用领域。虽然传统光伏 (PV) 系统（如屋顶太阳能阵列）长期占据住宅市场主流，但为了用户可以安全地使用 PIPV系统，需要深入地了解其所存在的特有的风险。

本白皮书旨在探讨以下内容：

- **传统光伏系统与 PIPV 在安装及电气布线集成方面有何区别。**
- **PIPV配置方法特殊，与现有布线的交互有导致过流可能，需要给予特别关注。**
- **PIPV 相关的特有风险**，主要源于并网逆变器输出电路未针对用户接触或安全触摸进行评估，可能引发触电危险。
- **考虑接地故障断路器 (GFCI) 的相关要求**以及 PIPV 与现有过流和接地故障保护装置的相互作用。

值得注意的是，与 PIPV 相关的其他危害已在 UL 3700《交互式可插拔光伏 (PIPV) 设备与系统认证调查大纲》中予以论述。该大纲由 UL Solutions 工程师与行业专家牵头制定，明确了随 PIPV 技术发展而演变的安全性及合规性要求。



了解可插拔式光伏 (PIPV) 系统 与传统光伏系统之间的差异

传统光伏系统通常包含光伏组件、安装支架以及逆变器，并将产生的直流电 (DC) 转换为交流电 (AC)。转换后的交流电可供常规电气设备使用，亦可满足家用需求或馈入公共电网。此类光伏系统还可整合至更广泛的分布式能源 (DER) 系统中，其中可包含储能等其他发电装置或部件。在住宅应用中，光伏系统通常安装在屋顶上。

首个光伏系统安装于 19 世纪¹，此后光伏技术突飞猛进。过去四十年来，随着光伏系统的大规模部署，业界积累了有关组件性能、潜在危害及降低危害的实用办法。因此，产品安全标准与安装规范持续更新，助力确立一套连贯且合适的规范，以推动风险防控。光伏系统及其子系统的安全标准旨在通过提升安全防护，以防止触电、火灾与机械伤害。

如今在美国及全球其他国家，光伏系统属于永久性安装，且只能由具备资质的专业人员采用符合安全标准认证过的设备进行安装与布线。此类安装须经法规部门检验核准，以确保符合适用法规。同时，电力公用事业工程师也会对并网光伏系统进行审查，以确认其满足本地电网并网要求。

1. [太阳能电池板简史](#), Elizabeth Chu 与 D. Lawrence Tarazano, 美国专利商标局。

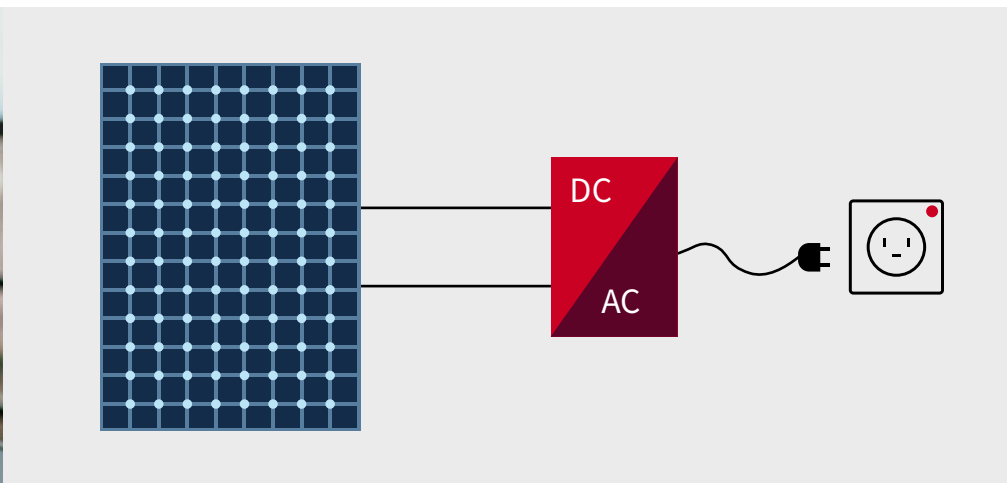


住宅用 PIPV 系统的兴起

可插拔式光伏系统 (PIPV) 是指通过电源线与插头连接标准插座, 从而接入建筑布线的光伏系统。这类系统利用电源线与连接插头, 将电能输送至普通家用插座。作为面向住宅场景推广的即插即用型解决方案, PIPV 产品专为消费者自行安装而设计, 为家庭采用太阳能提供了一种更为经济实惠的途径。部分 PIPV 产品被称为“阳台光伏”, 因为消费者可以选择将其安装在住宅阳台上。



(a)



(b)

图 1: (a) 阳台型 PIPV 组件装置; (b) PIPV 电气原理图。

图 1(a) 和 1(b) 展示了一套已安装的 PIPV 系统实例及其对应的电气原理图。

与传统光伏系统不同, PIPV 系统的电气布线 (具体指电源线) 属于非永久性安装。这类系统通常无需经过法规部门的审查与授权, 且在投用后, 公用事业机构也较少甚至几乎不进行监管。

这些特点使得对 PIPV 系统进行全面评估具备了必要性, 是否符合现有标准、规范及既有基础设施的要求, 需对产品本身及其安装进行深入的安全科学评估。

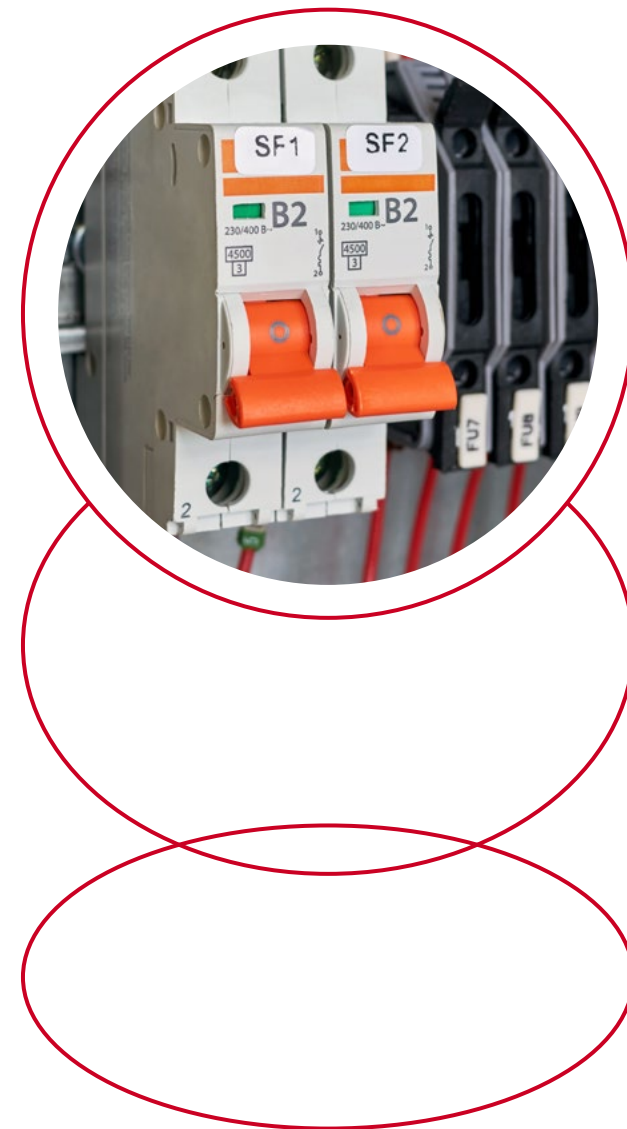
过流保护

美国全国消防协会 (NFPA) 发布的 NFPA 70《美国国家电工法》(NEC), 是适用于美国的电气安全模式规范, 涵盖场所安全、布线系统及住宅光伏安装等方面。NEC 已被美国数千个地方辖区采纳 (有时经修订), 并由授权监管官员执行。

根据 NEC 第 210 条与第 240 条规定, 分支电路及其导体须配置过流保护。第 210.20 节与第 240.4 节规定了过流保护装置的选择要求, 其依据包括负载大小、导体尺寸、导体类型、设备及插座额定值等。NEC 的这些安装要求, 以及已列名的过流保护装置, 共同为分支电路导体和负载提供针对各类过流情况的防护。

对于含有多路并行电源的电路, 其过流保护依据第 705 条, 尽管该条款并未明确涵盖接入分支电路的 PIPV。第 690 条的要求涉及光伏系统的安装规则, 然而现行要求主要针对通过专用布线永久接入场所电气系统的光伏系统, 并未专门规定通过插座连接的 PIPV 光伏系统。

NEC 第 210 条与第 240 条的要求基于单一电源 (即配电盘) 向负载电路供电的情形。PIPV 电源通过插座反向馈电, 会增加额外的电流, 而该电流不受上游配电盘分支电路过流保护装置的保护。两路电源同时向分支电路反向馈电可能导致导体过载, 并使该电路上的负载承受超出其评估、测试与认证限值的电流, 从而可能引发触电或火灾风险。



例如，一条由 15 A 断路器保护、采用 14 AWG 铜导线的室外分支电路，可设置多个 NEMA 5-15 插座以连接负载。若该电路发生过载，15 A 断路器将监测到超过 15 A 的电流并跳闸，从而如图 2 所示安全切断电路电源。

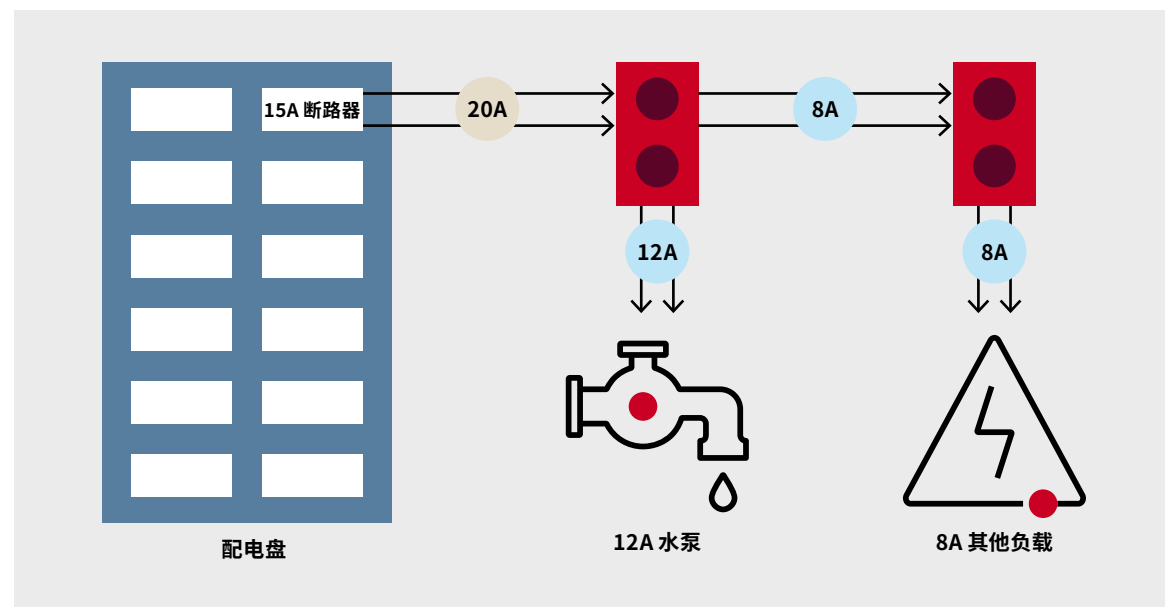


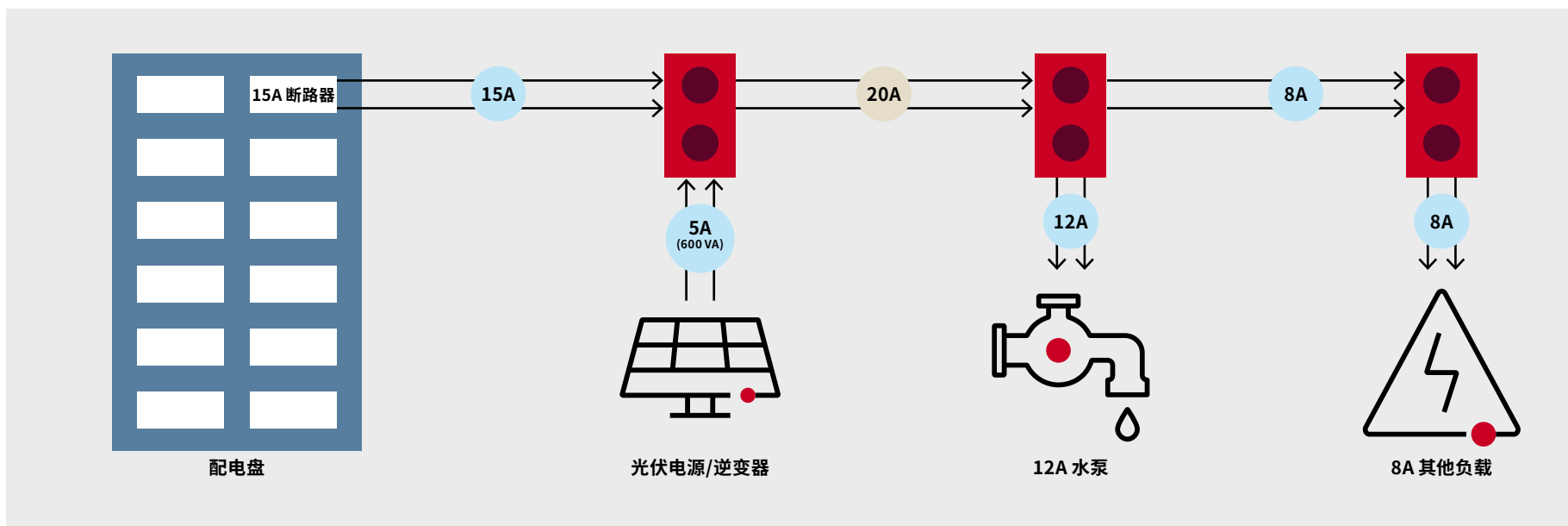
图 2: 未接入 PIPV 电源时的分支电路过载情形

然而，若同一电路上有 PIPV 产品通过其中一个插座反向馈电，则在该电路发生类似过载情形时，光伏逆变器也会贡献过载电流。当分支电路中来自公用电网（市电）的电流在 15 A 或以下时，配电盘处的断路器不会将该分支电路内的电流识别为过载，因而不会跳闸。但市电与 PIPV 发电的叠加电流可能导致电路持续过载，进而通过受损的导体、绝缘层和/或该电路所接设备，引发火灾或触电危险。

图 3 中示意了一种情形：市电与一台 600 VA PIPV 系统叠加的电流超过了分支电路的额定值，即 15 A。需注意，PIPV 电源功率可能大于 600 VA，也可能存在多个 PIPV 电源并联接入的情况。PIPV 电源越大，发生过载且不被监测到的风险越高；即使功率较小的光伏电源，也可能在分支电路导体上引发过载，且监测不到。

尽管 NEC 第 705.12(B) 节允许在满足特定条件时进行安装（即光伏电源输出电流乘以 125% 后与过流保护装置额定值之和，不超过配电盘等母线安培额定值的 120%），但应情况仅适用于负载接入母线、且主电源（市电）与光伏电源分别位于带负载母线两端的设备。这种配置因负载从两电源之间汲取电流，限制了母线过载的可能性。然而，母线位置要求及 120% 的限制并不适用于分支电路布线，且面向消费者使用的 PIPV 配置可能无法稳定维持该条件。

此外, 在配电盘应用中, 依据 NEC 第 705.12(B) 节允许来自光伏电源的额外 20% 电流, 每个分支电路都会为其导体和所接负载配备适当规格的过流保护装置。在实际使用 PIPV 系统的电路中, 导体和负载并未针对分支电路中增加的额外 PIPV 输出电流进行规格选型或保护。



当多个 PIPV 装置接入同一分支电路时, 用户可能在无意中增加导体过载的风险, 而现有过流保护装置无法检测此类情况。尽管通常不建议在同一电路上使用多个 PIPV, 但由于消费者对相关安全风险认识不足, 这种情况发生的可能性仍然很高。若 PIPV 产品采用标准 NEMA 5-15 插头, 并由未经电气培训的个人安装, 则该风险将进一步加剧。为应对上述问题, 下文将提出若干策略。此外, 随着法规进步和系统设计的优化亦可能出现其他解决方案。

图 3: 接入 PIPV 电源时的分支电路过载情形

专用电路配备 PIPV 专用插座

为降低难以检测的过载风险，其中一项有效策略是要求 PIPV 系统仅安装在专用分支电路上。这可确保电路不与其他负载共享，从而避免市电电源与 PIPV 电源的电流叠加超过导体额定值。实施该方法需采用特殊结构的插头与插座系统，使其仅能连接至指定电路，且与标准 NEMA 5-15 插座不兼容。如此可防止用户将 PIPV 装置移至其他电路，破坏该安全策略。在此配置下，PIPV 电源仅通过专用电路向配电盘中额定值匹配的过流保护装置回馈电能。只要该保护装置选型适配 PIPV 输出及导体容量，即可有效检测并切断过电流，从而保护线路与接线端子。

PIPV 专用插座配备集成过流保护功能

在设有多处插座的分支电路中，一项实用的应对措施是将首个插座更换为带集成过流保护装置的 PIPV 专用插座。该配置确保 PIPV 系统仅能连接至电路指定位置，避免用户将装置误插入其他缺乏适当保护的插座。通过将 PIPV 电源接入限制在单一专用插座，可显著降低因市电与 PIPV 电流叠加导致导体过载的风险。集成过流保护装置必须依据 PIPV 输出及分支电路导体规格正确选型，以确保有效检测并切断过电流。此做法通过控制 PIPV 系统的安装位置与电气特性提升安全性。

PIPV 专用插座采用更大截面积的导体

另一解决方案是将分支电路中首个插座更换为特定配置的 PIPV 专用插座，并搭配使用更大的导体。通过安装规格更大的分支电路导线，系统可承载来自市电与 PIPV 电源的叠加电流，而不超出导体载流量限制。在如图 3 所示的情形中，此举有助于降低过载风险。为保障安全运行，需将 PIPV 输出限制在规定的最大额定值内，并控制接入该电路的 PIPV 装置数量。该方案可通过采用专用插座配置来实现，以防止未经授权或意外连接。此外，电路上所有负载和插座均须按规划的总电流进行适当选型。例如，采用 12 AWG 铜导线（额定 20 A），按 80% 降额系数可安全承载最高 16 A 的持续电流。

电力控制系统 (PCS) 配备 PIPV 专用插座

另一项措施是在支路中接入支持 PIPV 安装的集成电力控制系统 (PCS)。PCS 技术通过 UL 3141 《电力控制系统检测大纲》进行评估，并在 NEC 第 120 条与第 705.13 节中有所提及，能够主动监测并调节多路电源的输出，协助将总电流维持在安全运行限值内。由具备资质的专业人员安装、且设计合理的电力控制系统可检测并响应市电与 PIPV 的叠加电流，从而防止分支电路导体过载。为保持兼容性与安全性，PIPV 系统须通过特定配置的插座接入，该插座仅允许连接至受电力控制系统保护的电路。此配置可防止用户将 PIPV 装置误插至未受保护的插座，从而确保过载处理策略的完整性。

并网逆变器的触电风险

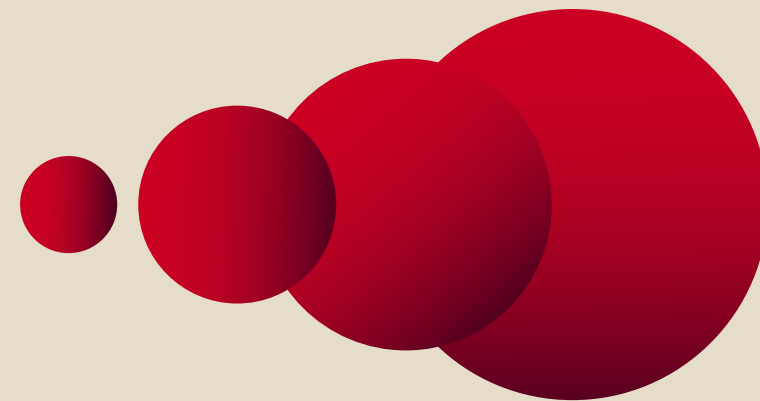
并网逆变器输出电路未进行用户接触及安全触摸评估

光伏逆变器的功能是将光伏组件产生的直流电能转换为可供负载使用的交流输出功率。电网并网逆变器是一种特定类型的光伏逆变器，它可以同步将电能输出给电网。通过 IEEE 1547 与 IEEE 1547.1 对并网逆变器的并网功能进行评估，并依据 UL 1741《用于分布式能源的逆变器、变流器、控制器和并网系统设备标准》来评估产品的安全性与电网连接功能。IEEE 1547 与 IEEE 1547.1 所规定的公用电网性能要求与测试，侧重于逆变器执行特定动作与功能，以支持公用电网稳定运行。部分电网性能功能包括在电网极端异常事件（如高压过电压、低压欠电压和电网电压缺失等）期间停止电流输出。在某些地区（例如加州），光伏逆变器在某些应用中还须具备一些高级电网支持功能。

这些并网性能的要求，是为了实现光伏逆变器与电网发电及系统保护设备的功能协同。根据并网性能要求，并网逆变器与发电设备的交流输出端子和布线，仅在电网出现特定异常工况时，才被限制或中断电流输出。并网逆变器的输出回路被视为危险回路。因此，必须采取防护措施，避免公众接触，并通过适当的封闭和隔离措施，确保与人体隔绝。

从表面看，要求并网逆变器输出电路停止输出电流的功能与防止人员接触逆变器输出端以保障安全的理念相近。然而，在硬件要求、软件要求及评估方法上，因并网性能要求而切断电流输出的方式，与为保护公众触电等危害而设立的输出防护措施之间存在显著差异。

此外，并网逆变器的大多数控制功能依赖软件实现。控制安全回路的软件需具备额外的评估与控制层级，从而可以避免操作失误及触电危险。并网性能的要求与测试，仅关注与电网连接的适用性，并未涵盖因公众可能接触逆变器输出端口而引发的触电、漏电或火灾等风险。PIPV 产品采用插头作为电能输出接口，这种非常规的使用方式构成了严重的安全隐患。



应对公众触电安全的防护措施

产品的安规标准与电气规范旨在保护公众避免可能带来危险（例如触电风险）的电路与器件。通常，存在电气安全问题的器件会被封闭处理，防止接触；仍有接触可能的部件则需经过严格评估，确保其符合安全标准。这些部件须被证明在正常或可预见的异常情况下均不构成危险，此概念通常称为“安全触碰”。

实现安全触碰的电路须采取可靠且稳健的防护措施，防止危险电压或电流被人接触。这些防护措施需在常规与非常规运行条件下接受测试，以评估过载、硬件故障、绝缘失效及软件故障等情形。尤其是在设计与测试面向公众使用的消费类产品时，应特别考虑在发生故障时产品的默认设置会进入安全状态，以最大程度降低触电、漏电或火灾的风险。这种“故障-安全”设计原则是现代工业安全理念的基石。

例如，为众多消费类电子产品供电的 USB 电路及二级低压限能电源，在设计、测试与认证时均假定消费者可能接触到输出端。这些输出端口需经过严格评估，以保证在正常及可预见的异常情况下的低电压与受限能量输出，从而降低危险。

即使安全触摸电路已通过防触电评估，其导体与部件也必须与所有其他危险电路和未绝缘带电体（如更高电压的光伏直流侧与电池回路）保持适当的间距，并进行隔离与绝缘，以防止安全触摸电路因邻近危险电路而意外带电，从而丧失防护功能。

尽管 PIPV 和交流组件在外观上具有相似性，但在安装方式、安装位置及用户接触方面存在显著差异。交流组件及其布线通常不暴露于公众可接触的环境中。引证，NEC 第 690.33(C) 条要求任何用户可触及的连接器必须为锁紧型，以防止接触危险带电体。交流组件及其布线通常安于屋顶，不易被用户接触到，从而也不产生相关的物理干扰或损坏。

相反，在潮湿环境下，必须使用接地故障断路器 (GFCI)，避免用户可能接触到受损产品或线路而引发的触电风险。光伏组件的结构包含玻璃与柔性塑料薄层，用于封装电池片与内部布线并提供绝缘保护使其能在危险电压范围内工作。在除屋顶外的使用环境中，光伏组件更易受损，可能导致用户接触带电组件。PIPV 的产品类型、安装位置、与用户的接近程度以及频繁接触的可能性，均要求其必须配备 GFCI 保护。

值得注意的是 GFCI 保护仅适用于 PIPV 系统的交流侧。PIPV 中的直流电路有其它触电风险，且通常与交流侧隔离，因此 GFCI 设备无法防护直流侧的触电危险。由于光伏组件在光照下始终带电，直流电路需采用其他保护措施，如物理隔离、电子安全防护或二者结合。UL 3700 标准涵盖了适用于这些直流电路的防护策略。

PIPV 输出线缆与连接插头的相关风险

大多数市售 PIPV 产品采用带外露插脚的通用 15 A 电源线。用于电源线终端的常见的 15 A NEMA 5-15P 连接插头，原设计用于将用电设备（如电器）连接至带电插座。当插头从插座拔出时就不再带电；在连接负载至插座的情况下，它们一般不构成触电风险。然而，此类插头并非作为电源的输出导体而设计、评估、测试或评定使用。PIPV 产品暴露于阳光下即可发电，从而使外露插头的带电值达到危险水平，除非已采取特殊的解决措施。

IEEE 1547 对电网输出的限制并非为了防护人员免受触电危险。在孤岛运行或开相条件下，逆变器允许最多 2 秒的响应时间来切断电流输出。这 2 秒的宽限时间，连同单点故障触电风险可靠性评估的缺失，就可能导致 PIPV 产品外露插头带电。因此，仅依赖逆变器的并网功能来防止 PIPV 插头带电的风险并非适宜的解决方案。

新的 PIPV 产品安规要求中，除并网性能要求外，还需补充安全触摸相关要求，以保护用户免受 PIPV 输出电路的触电危险。安全触摸限制需包含额外的硬件保护措施、不同的保护组件，以及更多的评估与测试（包括软件安全评估）。安全评估必须考虑保护硬件回路关键组件的单点故障及软件故障。



PIPV 输出电路触电保护的潜在解决方案

仅依靠并网性能功能不足以保护用户免受 PIPV 插头及输出电路中其它可触及部件的触电危险。PIPV 输出电路触电保护的有效方法包括：

- **PIPV 专用配置的插头和插座 –**
一对采用独特结构配置的接插件，不含用户可接触到的带电体。
- **可接触的并网/安全触碰输出电路 –**
一种并网逆变器，其中为 PIPV 输出电路增设额外保护措施，以提供必要且可靠的公众触电防护。这将需要对软件与硬件进行额外的功能安全评估，以证明在常规与非常规（故障）条件下，相关危险已得到释放。



用于 PIPV 系统中的GFCI接地故障 电路保护

接地故障断路器 (GFCI) 是一种生命安全设备,旨在保护人员免受因设备或线路损坏而引起的触电风险。《美国国家电工法》(NEC) 要求在潮湿且可能增加触电风险的环境中必须使用 GFCI 防护。常见的应用示例包括室外区域、潮湿或湿润场所,以及靠近水槽、浴缸或游泳池的空间,例如浴室、厨房和泳池水泵回路等位置。根据 NEC 第 210.8 (A) 节,所有服务于住宅单元的室外回路均须配备 A 类 GFCI 防护,可通过以下至少一种认可的安装方式实现防护:

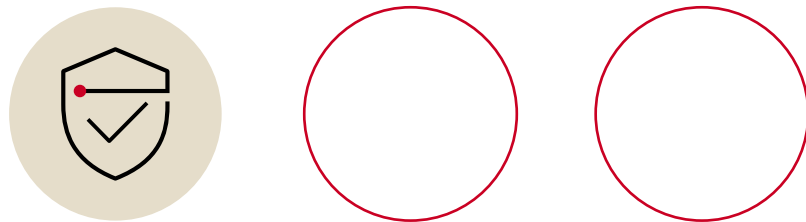
GFCI 断路器 -安装在为单个或多个室外插座供电的分支电路配电箱中

GFCI 插座 -安装在分支电路中,位于为多个室外插座串联供电的第一个插座位置

应注意,NEC 第 210.8 (A) 节要求室外插座使用分支电路,且该电路应与建筑物内的其他负载(包括室内回路)相互独立。



与PIPV交互导致GFCI 接地保护功能丧失产生的安全风险



GFCI 损坏

传统电流的流动路径是“电源-负载”，当 PIPV 接入按此单向电流逻辑设计与评估的分支电路时，一旦产生反向馈电，将引发严重的兼容性问题。

UL 943《接地故障断路器标准》对单向电流流动（例如从配电盘流向负载）下的 GFCI 保护进行评估。这种单向电流流动特性通过 GFCI 设备上强制标识的“线路端”与“负载端”接线端子来表示。为降低公众触电风险，这些电路的 GFCI 保护必须在使用与安装过程中持续有效。

目前已发现，在反向馈电时因 GFCI 被错误使用而产生重大问题。这种损坏会导致 GFCI 电路失效，电源仍能继续供电，同时使分支电路丧失 GFCI 本应提供的触电防护。

可以预料到的是，使用配备标准 NEMA 5-15 连接插头的 PIPV，可能导致其在未受控情况下被安装并连接到非双向设计的断路器或插座型 GFCI 保护电路上。

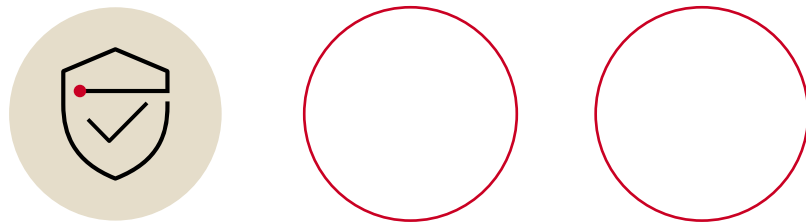
PIPV 产品设计的理念是为了让消费者能够将其直接接入现有的住宅电气回路中使用。然而，将电能反向馈入配备 GFCI 保护的电路——此为 PIPV 的设计功能——目前并不在 GFCI 认证与性能标准的适用范围内。为适应这种双向电流流动，需对 UL 943 标准进行更新，确保当存在 PIPV 系统时，分支电路的 GFCI 保护功能得以维持。相关更新应包括适用于双向使用的设备的规定标识。归根到底，这将要求在连接 PIPV 系统的电路上安装经过专门评估和认证的双向 GFCI 设备。

随着电网电压的升高，触电风险相应增加，需要相应的缩短跳闸时间，限制触电能量。若受保护电路上的本地负载电流低于逆变器的发电输出电流，电路电压将上升，直至逆变器停止输出电流。UL 943 标准中提出断开持续时间的限制与电压有关：在 GFCI 跳闸后，较高的电路电压会增加触电能量，因此需要缩短 GFCI 响应时限，也就是缩短跳闸时间。GFCI 跳闸后的电压取决于逆变器的输出电流和该回路上的负载情况。GFCI 本身无法通过切断光伏逆变器的输出电流来防范由此增加的触电危险。

在发生接地故障时，断路器型 GFCI 仅断开未接地的载流导体，以隔离并切断从配电盘流向受保护负载回路的电源。对于由断路器保护的 GFCI 回路，接地导体（零线）仍通过配电盘内的零线接地连接基准源电路，并保持固定连接。该零线接地连接基准源电路为光伏逆变器输出电流提供了一个以接地源电路的逆流通路，这意味着即使断路器型 GFCI 跳闸，来自光伏逆变器输出的接地故障电流路径也不会被中断。

即便某回路配备了适当的双向 GFCI 保护，采用标准 NEMA 5-15 连接插头的 PIPV 仍可能被误接或故意接入未配备适宜的双向 GFCI 保护的分支电路中，且该分支电路无法同时中断火线与零线载流导体，从而极有可能在无保护的电路上引发严重的触电危险。

与PIPV交互导致GFCI 接地保护功能丧失产生的安全风险



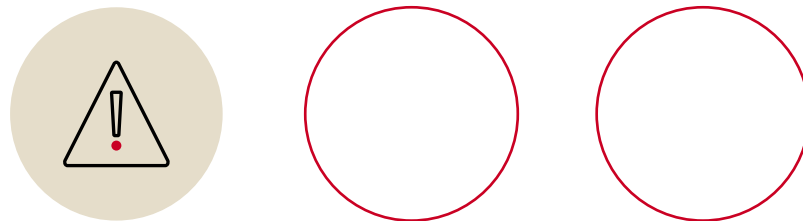
GFCI 保护“失效”（盲区）

与 GFCI 保护相关的第二个重要担忧是，使用 PIPV 时可能导致 GFCI 保护功能陷入“盲区”。当 PIPV 作为并联耦合的电源接入分支电路后，与两个或多个电源共用主配电盘中心位置的零线来接地联结基准源电路。在发生接地故障时，分支电路的 GFCI 保护可将市电电源从负载侧断开。不过，在市电断电后，接入该隔离负载回路的 PIPV 并联电源仍会持续向接地故障点持续供电，持续时间可达两秒。对于由 PIPV 隔离型光伏并网微型逆变器反向馈电的、受 GFCI 保护的分支回路，UL Solutions 已开展相关测试，以观察该 GFCI 保护回路被并网逆变器负馈电时的情况。详见附录 A。

PIPV 可能导致所需的接地故障电路保护陷入“盲区”，这构成了重大的安全隐患，需要采用经工程设计的解决方案，方可在实际应用中最大程度降低此类风险。



接地保护GFCI如何减少 PIPV系统风险



下文列出的潜在解决方案，可用于缓解由 GFCI 相互作用引发的风险。需注意，亦可能存在其他适用措施。

独特的即插即用连接方式 – 要求 PIPV 采用独特的（非 NEMA 标准）连接器配置，由同一制造商提供配套的插头与插座，实现互锁。此设计可防止 PIPV 插入现有的非 PIPV 专用回路，从而降低上述触电风险。独特的配置是防止误用的有效手段，既能避免削弱现有传统 GFCI 保护，也能防止对非双向 GFCI 设备进行反向馈电。当配备专用配套插头和插座的 PIPV 被安装于分支电路的合适位置上，且带有经认证、标识和评估的 GFCI 保护装置提供防护时，可维持所需的 GFCI 防触电效果并降低风险。

专用回路 – 要求 PIPV 仅能安装在专用回路上（例如，不允许接入其他插座和负载的回路），有助于确保该回路配备兼容的 GFCI 保护。





总结

PIPV 产品为公众利用可再生能源发电、使用清洁电力提供了创新方式。然而，其接入传统布线系统的安装方式，可能给美国 and 全球其他地区的使用者带来重大安全隐患。

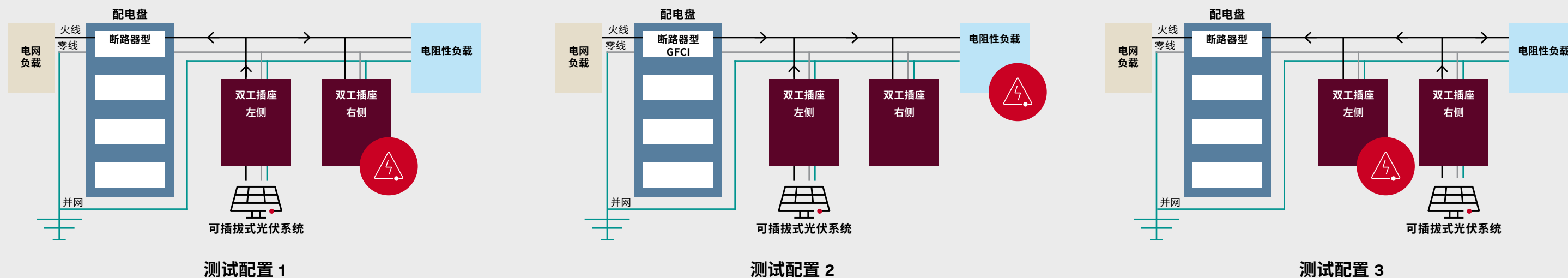
基于上述提及的隐患，需要制定特殊的风险把控机制，确保 PIPV 产品的安全使用。在缺乏这些特殊措施的情况下，PIPV 可能对消费者构成触电和火灾危险，并可能在用户毫不知情的情况下，引起先前设定的防护手段失效。UL Solutions 概不支持任何随意允许 PIPV 接入现有分支电路且未对上述隐患采取规避措施的做法。我们有必要采用且实施一系列经过工程设计的解决方案，以保障 PIPV 产品的安全使用。这些解决方案可包括产品自身安全特性设计，以及特殊的安装规范，助力公众在自由选择电力来源的同时，依然能获得充分的安全保障。

附录 A

PIPV 中的 GFCI 研究测试

UL Solutions 已开展相关测试, 研究由隔离型光伏并网微型逆变器 (具备双向电流能力) 在反向馈电时, 受 GFCI 保护且带有多个插座的分支回路将如何表现。本研究在额定电压 120 Vac 的单相分支回路上进行, 针对三种可能的 GFCI 安装配置进行了实验室测试。

以下三种测试配置的区别在于电流流动方向。测试配置根据隔离型光伏逆变器的位置、接地故障、GFCI 位置和 GFCI 类型而异。



GFCI 断路器测试

所有测试配置最初均在配电盘中采用带 GFCI 功能的断路器进行。测试中设置了一个 500 欧姆的接地故障阻抗,以模拟 UL 943 标准要求的人体阻抗模型。在电路中标有闪电符号的位置接入一个模拟接地故障,链接该回路中的500 欧姆电阻。UL 943 要求 GFCI 在 120 伏交流电 (VAC) 工况下,于 28.6 毫秒 (ms) 内切断电路。如果 10 次测量的平均响应时间满足 28.6 ms,则判定为合格。在没有光伏逆变器接入的情况下,对由断路器型 GFCI 保护的电路进行了基线测试。GFCI 断路器成功检测到接地故障并切断电路,使负载断电,响应时间为 12.6 ms 内(10 次测量的平均值)。

测试配置 1、2 和 3 均在隔离型光伏逆变器持续向电路输出功率的条件下,引入了 500 欧姆接地故障。记录每种配置的测试结果,并计算 10 次测量的平均值。

测试结果如下:

配置 1 – 36.3 ms

配置 2 – 32.8 ms

配置 3 – 36.7 ms

所有测试结果(10 次测量的平均值)均超过了 UL 943 要求的 28.6 ms 的最大允许切断时间;此外,UL 943 还要求任何单次测试迭代均不得超过切断时间上限的 125%。

仔细观察测试结果的示波器数据:蓝色波形表示流经 500 欧姆人体模型的接地故障电流。如蓝色波形所示,断路器型 GFCI 在略多于半个工频周期时检测到故障并打开了电路,随后 GFCI 切断了电网供电。在 GFCI 断路器开路后,电网电源(以红色箭头示)仍通过光伏逆变器的输出电流继续流动,直到其防孤岛效应检测到电网断电并停止交流输出电流。红色箭头右侧的蓝色和绿色波形清晰地显示了,在 GFCI 跳闸后,光伏逆变器仍持续向接地故障输出电流,持

续约 1.5 个周期。蓝色波形清晰地显示了来自电网的接地故障电流与光伏逆变器持续电流的总持续时间,直至防孤岛效应工作,并在 35.1 ms 时停止电流输出,这已超出 UL 943 规定的限值。



蓝色波形 – 通过 500 欧姆人体阻抗模型的接地故障触电危险电流

绿色波形 – 接地故障两端电压。在 GFCI 跳闸 (红色箭头处) 之前的电网电压, 以及 GFCI 清除后由逆变器输出电流维持的电压

紫色波形 – 光伏逆变器输出电流

请注意, 本次测试随机选取的 GFCI 断路器的实际动作时间明显快于 UL 943 要求的响应时间。其他仍符合 UL 943 要求的 GFCI 断路器可能表现出更长的响应时间, 最长可达 28.6 ms。

根据 UL 1741 和 IEEE 1547 的防孤岛效应性能要求, 并网逆变器在检测到电网断电后, 必须在两秒内停止交流电的输出。并网防孤岛效应是一项功能性能, 本质上具有可变性, 具体取决于并联负载和为电路供电的电网状况。对防孤岛效应工况的响应时间通常在若干个周期之间变化, 最长可达两秒。GFCI 的安全性能要求与并网性能要求并不兼容, 因此需要额外的保护措施来确保 GFCI 的时序和能量限制, 从而有效防范触电风险。需要指出的是, 在上述接地故障测试工况中, 所选逆变器的响应速度快于并网要求允许的两秒上限, 但并非所有逆变器都能实现如此快速的响应。

GFCI 插座测试

本节介绍使用 GFCI 插座 (而非 GFCI 断路器) 针对如上三种配置进行的测试。测试结果符合 UL 943 对切断时间的要求。GFCI 插座的不同之处在于, 它会同时断开未接地的火线和已接地的载流带电的零线。通过切断零线与接地端的连接, 光伏逆变器的输出电路与配电盘的零线接地连接点被切断, 从而消除了逆变器为接地故障电流提供逆流通路的可能性。在前一测试案例中也观察到这种现象: 在逆变器因防孤岛效应而停止输出电流期间, 即使 GFCI 已跳闸, 逆变器输出电流仍能持续流向模拟人体模型的 500 欧姆阻抗。在本次 GFCI 插座测试条件下, 逆变器在配电盘中失去了零线接地连接点参考。也就是说, 逆变器输出无法再向以 500 欧姆阻抗 (模拟的人体模型) 的接地故障点输送电流。这些结果表明, 必须使用双向型 GFCI。此类设备能够断开并中断所有载流导体, 从而在逆变器因防孤岛效应而停止输出电流期间, 消除接地故障基准源电路, 并确保 GFCI 的切断时间满足限制故障能量的安全要求。

分支电路与地面之间的任何电气参考, 都可能为并网逆变器提供回流通路, 从而输送接地故障电流, 引发触电风险。许多电气产品为降低噪声, 会在载流导体与地线之间刻意安装滤波电路。这些滤波器, 以及下一节将描述的常见的漏电电路和接线错误电路, 都可能以类似方式为逆变器输出电路建立基准源电路, 导致电流持续输出时间超出 UL 943 为 GFCI 保护设定的安全限值。

其他测试

我们预计未来将对单相三线 (120Vac/240Vac 配置, 共用零线, 通常称为分相) 配置中的其他保护技术, 开展更多关于 PIPV 的测试。此配置同样需要针对 PIPV 的实际使用进行评估。

附录 B

美国与欧洲的差异

PIPV 产品在欧洲市场已颇为流行。欧盟家庭电路中普遍安装有残余电流保护装置，例如带过流保护的残余电流断路器 (RCBO) 和残余电流断路器 (RCCB)，用于提供触电防护以及过流防护。此类保护装置要求断开所有载流导体 (如 2 极、4 极)，以确保残余电流保护功能持续有效。插座型 GFCI (功能上类似于残余电流装置 RCD) 会断开所有载流导体，从而维持可靠的接地故障保护。然而，断路器型 GFCI 仅断开未接地的导体，而保持零线与接地端的连接。这种做法导致 PIPV 逆变器能够继续输出电流 (最长可达两秒)，从而削弱了 GFCI 的触电防护效果。

RCCB 在美国并不常见，其与美国规范 (如 NEC) 所要求的接地故障断路器 (GFCI) 保护在若干方面存在显著差异。

RCCB 与 GFCI 的核心功能均旨在降低由电力系统所供负载产生的触电风险。这些保护装置监测、测量并限制因电器损坏、线路故障或其他用电设备问题而产生的接地故障电流 (这类电流可能导致接触带电部件的成人和儿童触电死亡)，并在极短时间内切断流向

接地故障点的电流。在 120Vac 电压下，GFCI 产品必须在 0.0286 秒内切断接地故障电流，以限制可能流入人体的触电能量，从而避免触电死亡的风险。根据 A 类方程式的规定，随着交流接地故障电流幅值的增大，断开时间会相应缩短，以限制暴露时间和总触电能量。

主要区别在于：GFCI 在 $5\text{mA} \pm 1\text{mA}$ 时切断电路，提供“摆脱保护”，使人员能够自主脱离触电危险。RCD 在 30mA 时切断电路，此阈值旨在防止发生心室颤动，相较于 GFCI 允许略长的触电暴露时间。美国标准的阈值更低，为包括儿童和老年人在内的对触电更为敏感的高风险人群提供了更为保守的保护。



ULSolutions.com.cn

© 2026 UL LLC 保留所有权利。

EIA3412350