

隔离技术是光伏逆变器安全可靠的保证

Isolation technology is photovoltaic inverter safety reliable guarantee

叶云燕

摘要 :本文对 PV 逆变器中的信号和电源隔离技术及如何利用微变压器集成隔离功能以提高系统性能和可靠性、降低系统尺寸和成本等问题作研讨分析。

关键词 :微变压器, 隔离, 栅极驱动器

Abstract: this will be to PV inverter of signal and power isolation technique and how to use micro transformer integrated isolation function in order to improve system performance and reliability, reduce the system size and cost of discussion analysis.

Keywords: micro transformer, isolation, gate drive

中图分类号: TN86 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2013)09-5-131

应该说, 由于长期处于高位振荡的油价和环保要求的苛刻促使如今的光伏 (PV) 产业有了飞速发展。但必须看到的是另一方是其成本的高昂却成为 PV 产业升级的一大挑战。只有进一步降低成本才能使该产业成为可持续性的发展并与传统的煤电能源在竞争中永远处于优势。与此同时, 虽然新的分布式太阳能发电系统呈现成为节能高效的有效方案, 然而在太阳能发电系统中除太阳能电池板以外其光伏逆变器是促使成本高的主要部件, 为此用新一代并网 PV 转换器 - 微型逆变器除了可解决安全和可行性外又是降低成本重要途经。而实践又证明, 因为这种器件不但可以提高系统可用性, 而且能够大幅提升遮光条件下的性能。PV 微型逆变器设计方案中很重要是信号和电源的隔离技术。并网 PV 转换器为把获得的直流与交流网相隔离, 其隔离的作用通常是满足安全法规的要求, 防止直流注入交流网, 是安全和可行性的有效保证, 有利于配电变压器和传统的瓦特小时电表的使用。为此本文将对 PV 逆变器中的信号和电源隔离技术及如何利用微变压器集成隔离功能以提高系统性能和可靠性、降低系统尺寸和成本等问题作研讨分析。

1 PV 逆变器微型变压器隔离技术的呈现

1.1 并网光伏逆变器的基本理念

无论采用何种技术, 逆变器的基本设计都很明确, 且非常相似。其核心就是将直流电压 (光伏组件) 转换成交流电压 (可并网) 的过程。在转变的过程中, 不停地转换直流电的正负极连接, 从而形成方向变化的交流电。所以, 逆变器的关键部件是桥接开关 (晶体管元件), 这个开关桥的一侧连接输入的直流电源, 在另一侧连接交流电网。图 1 所示为并网光伏逆变器的基本架构。在工作过程中, 只有两个相对的开关可以同时关闭。如果将此开关桥的开关速度设置成与电网频率相同, 则在理论上可以将桥的输出侧与电网连接。但是, 由于这样输出的电流是方波, 且强度没有变化, 因此需要在输出端安装一个具有铁芯的电感器, 用以将输出电流控制成为正弦波形状。桥的断开采用脉冲过程进行, 从而形成与脉冲相关的较小电流分量。这样的电流分量可以对电感器的电流进行控制。脉冲的频率一般为 20kHz, 这样就完全可形成 50Hz 电流。

可用于直接并网的逆变器的基本功能。但在实际应用

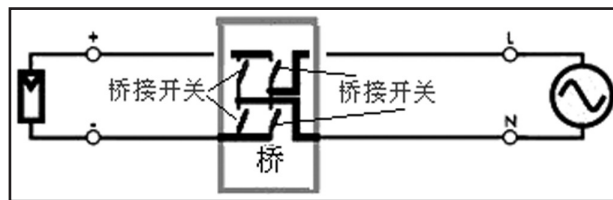


图 1 并网光伏逆变器的基本架构

中, 输入电压的范围具有一定的局限性。对于并网发电应用, 其输入电压必须在任何时刻都高于电网的峰值电压。当电网电压的有效值为 250V 时, 达到正常并网要求的发电侧的最低电压应为 354V。并网的逆变器的基本功能有多种方法。

1.2 无变压器逆变器缺陷

光伏并网逆变电源在技术上有三个类型: 无隔离变压器型; 工频变压器隔离型; 高频变压器隔离型; 无隔离变压器型的并网逆变器存在发电安全性、并入交流电网中的直流分量等问题, 因此无隔离变压器型的并网逆变器在新安装的太阳能发电系统中份额每年逐步下降, 乃至在大部分地区逐步被禁止。

众所周知无变压器型逆变器相对体积较小、重量较轻、价格也比较便宜, 在很多方面都比变压器型逆变器更具优势。但无变压器逆变器可能会受到大接地漏电流和注入的直流的影响。因为 PV 电池板与交流网之间存在很大的电池板电容而且缺少隔离, 如果有直流组分注入电网中的交流电流中, 其结果可能导致配电变压器饱和, 故这种情况是不允许的。为此许多安全标准对电网中注入的直流电流进行了严格的规定, 据此, 必须对变压器进行隔离, 即在电池板与电网之间采用变压器隔离技术可以消除因电池板相对于电网的电压差而产生的直流注入路径, 即通过隔

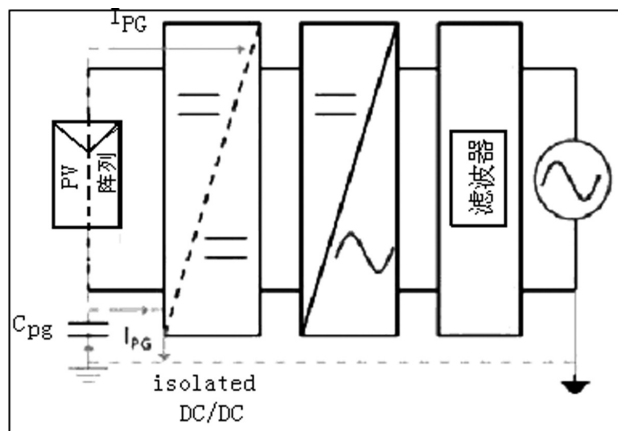


图 2 为逆变器变压器隔离技术基本构建框图

离阻断直流注入, 其基本构建框图见图 2 所示。

1.3 新型基于微变压器的信号和电源隔离法的应用

先述用微型逆变器连接太阳能板是优化太阳能系统有效途径的理念。优化太阳能系统效率和可靠性的一种较新方法是使用连接至每个单独太阳能板的微型逆变器。为每

个太阳能板都安装其自己的微型逆变器, 让系统可以适应其变化的负载和空气环境, 从而为单个太阳能板和整个系统提供最佳的转换效率。微型逆变器构架还实现了更简单的布线, 从而实现更低的安装成本。通过提高用户太阳能系统的效率可缩短系统的初始技术投入回报时间。

1.4 关于基于微变压器的信号和电源隔离法的应用

传统上, 隔离是由光耦合器实现的。然而, 光耦合器的电流传输功能会随着时间的下降, 可能几年后就无法运行, 远远低于许多太阳能电池板提供的 20 年寿命担保。故使用基于微变压器的信号和电源隔离法。该微变压器可以用于提供集成的信号和电源隔离, 最大额定值为 5kVrms。对于信号传输, 输入数据通常在编码之后再传输给数据变压器原边。副边则通过解码来还原信号。输入与输出之间的隔离通过初级线圈与次级线圈之间的绝缘层来实现。

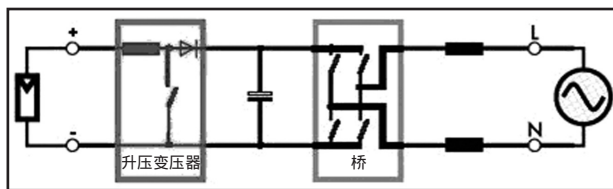
2 多种隔离集成技术是隔离关键技术在并网 PV 逆变器中的应用

值此仅以一个 3 级集成技术与高电流输出栅极驱动器相集成的二种隔离技术在并网 PV 逆变器中的应用为典例作分析介绍。

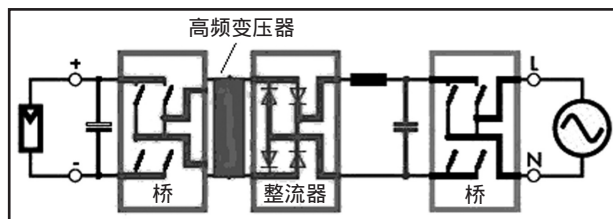
2.1 集成隔离关键技术在并网 PV 逆变器中的应用

先述集成隔离关键技术方案设计思想。其一是采用电子升压变换器 (见图 3(a) 中红线图所示) 以提高输入电压值。

其二是采用带整流器的高频变压器 (见图 3(b) 中红



(a) 采用电子升压变换器以提高输入电压值



(b)

图 3

线图所示)以提升输入电压值。

集成隔离关键技术在并网 PV 逆变器中的应用,其基本架构见图 4 所示。

图 4 为根据集成隔离关键技术设计方案思想所构成的 3 级集成技术的隔离基本架构。

首先在此需要说明的是,对微逆变器的特殊应用需求来说决定了其不能采用传统的降压型逆变器拓扑结构,如全桥、半桥等拓扑,而应该选择能够同时实现升降压变换功能的变换器拓扑,除能够实现升降压变换功能外,还应该实现电气隔离;另一方面,高效率、小体积的要求决定了其不能采用工频变压器实现电气隔离,需要采用高频变压器。根据上述集成隔离关键技术设计方案思想可构成图 4 的 3 级集成技术的隔离基本架构。其图 4 的 3 级集成技术的隔离基本架构为:

第 1 级是一个可选的升压转换器,用于提高电池板电压,该电压然后再通过隔离 dc-dc 转换器级。该隔离 dc-dc 转换器包括一个通过高频变压器的 dc-ac 转换功能。该高频变压器具有尺寸小、效率高的优势。副边的交流被整流成通常高于电网峰值电压的直流电压。

第 3 逆变器级,整流形成的直流再通过第 3 逆变器级转换成电网线路频率。需要检测电池板输出电压和电流,并将其馈入一个微控制器,以执行最大功率传输跟踪

(MPPT) 算法。同时,该微控制器还负责控制隔离 dc-dc 和输出逆变器的栅极驱动器。输出逆变器位于电网一端,其接地电压与直流电池板接地电压不同,从微控制器到逆变器驱动级的通信需要隔离。通常需要四个光耦合器,但它们功耗较高,其较大的传播延迟也可能影响栅极驱动器的时序精度,从而影响到逆变器的效率,而且最重要的是,它们难以支持 PV 电池板 20 至 25 年的担保寿命。

第 2 级是基于高频变压器(微变压器)的隔离器,另一方面,基于高频变压器(微变压器)的隔离器功耗要低得多,传播延迟要短得多,而且性能不会随时间而下降。

关于为栅极驱动器提供隔离电源。多通道隔离器也可以与片上 DC-DC 转换器集成,以便为栅极驱动器提供隔离电源。在逆变器输出与并网之间用继电器来确保逆变器输出频率和相位与市电电压同步,同时,还能在电网发生故障时或者在市电电压或频率超过可接受限值时迅速断开,从而实现防孤岛保护。在电网一端需要电压检测功能以检测零交越,同时也需要电流检测功能,以确保负载中馈入的是正弦波电流。检测信息可以通过隔离 ADC 传送给控制器。隔离 ADC 集成一个 16 位二阶 $\Sigma - \Delta$ 调制器和基于微变压器的数字隔离功能,能够实现 3.75kV 的隔离,是分流电流检测的理想之选。电流变压器也可用于电流检测,但它们价格昂贵、体积庞大,而且可能对外部磁场非常敏感。

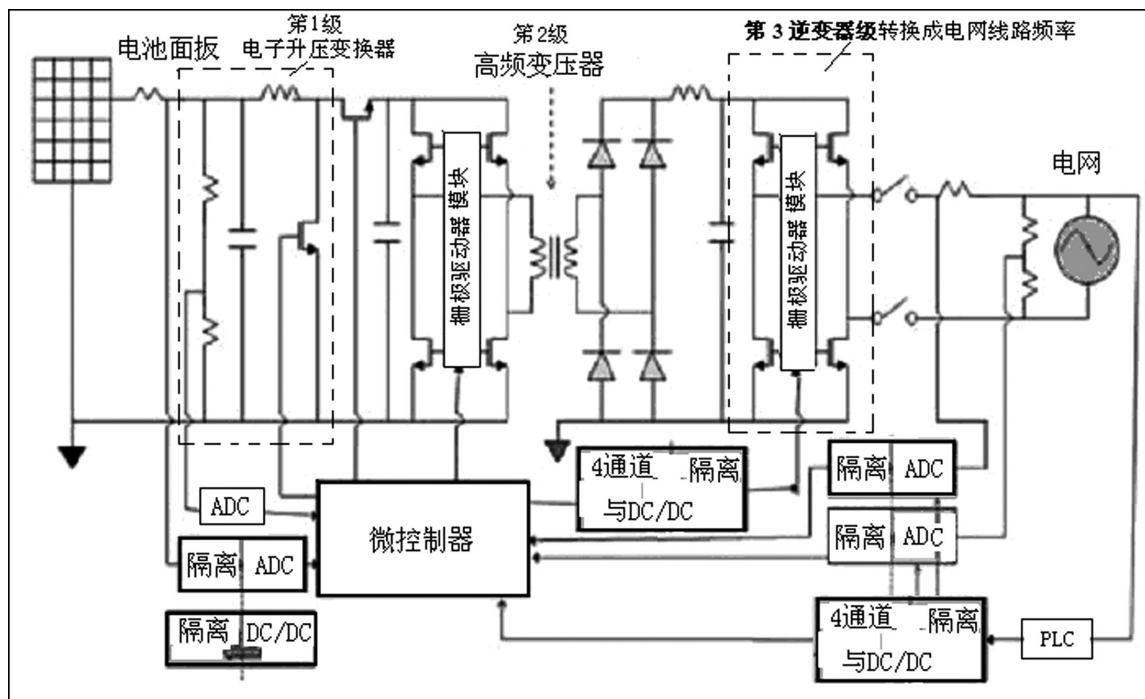


图 4 所示为 3 级集成技术的隔离基本架构示意图

也可以使用霍尔效应检测器,但它们在非线性度和失调方面先天不足,结果会影响到电流测量值的精度。分流与集成隔离 ADC 一起形成一种可靠的低成本替代方案。隔离 ADC 在电网一端也需要隔离电源以驱动自己,同时,可以集成基于微变压器的隔离 DC-DC,从而省去使用分立式 DC-DC 转换器的诸多麻烦,当需要 PLC 通信时,电网端的 PLC 芯片可以由隔离 DC-DC 来驱动,而其与电池板一端的控制器的通信则通过一个多通道隔离器来实现。

由此可知,从微逆变器的拓扑方案角度看,应包括高频链逆变器、升压变换器与传统逆变器相组合的两级式变换、基于隔离式升降压变换器的 Flyback 逆变器等多种,其中 Flyback 变换器拓扑结构简洁,控制简单、可靠性高,是一种较好的拓扑方案。它是微逆变器的关键性技术之一。

2.2 高电流输出栅极驱动器相集成的隔离技术

基于微变压器的隔离方法也可与高电流输出栅极驱动器相集成,以形成全隔离半桥栅极驱动器。图 5 所示为高电流输出栅极驱动器相集成的隔离技术在并网 PV 逆变器中的应用方案。

对于原边的 DC-AC 全桥开关,通常没有必要为低端栅极驱动器(尤其是低功耗逆变器)设置隔离。对于两个

高端开关,具有 4A 驱动能力的 2 通道 1kV 隔离驱动器就能胜任工作。逆变器开关位于交流端,因此,低端和高端都需要隔离栅极驱动器。要使直流端的微控制器与交流端的逆变器直接通信,通常需要 2.5kV 或 5kV 隔离栅极驱动器。低端栅极驱动器可以由集成的 DC-DC 驱动(其动力来自电池板一端),而高端电源则可通过自举解决方案来提供。每个半桥栅极驱动器均由 3 向隔离构成,即是说,输入与输出之间存在隔离,两个输出之间也有隔离。输入到输出的隔离通过片上变压器提供。

对于多逆变器并系统(如串式逆变器),逆变器之间也需要通信,这一般是通过 RS-485 总线、RS-232 总线或者 CAN 总线(需要隔离时)实现的。自驱动隔离收发器将从电池板端获得总线端所需要的电源。微逆变器也开始受到人们的青睐,因为它们有助于提升系统的可靠性和性能。它们还有利于解决串式逆变器存在的潜在直流电弧问题。微逆变器一般安装在楼顶电池板的下方,这种条件下的环境温度可能非常高。高温会加快光耦合器中 LED 性能的下降;另一方面,基于微变压器的隔离方法,其性能不会随时间而下降,在这些极端条件下表现卓越。微逆变器可以使用单级逆变器而非全三级逆变器,以降低系统成本。每个微逆变器的功耗可能仅仅为两三百瓦特,在这一功耗水平下,隔离集

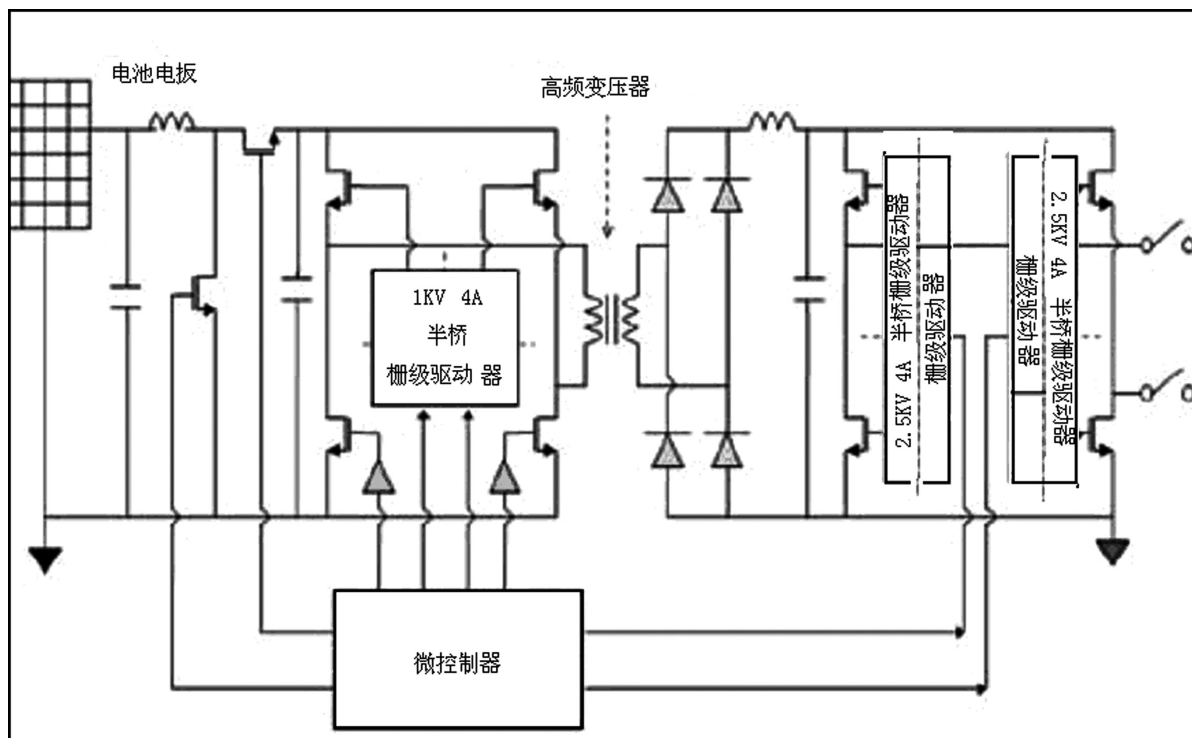


图5 电流输出栅极驱动器相集成的隔离技术在并网PV逆变器中的应用方案示意图

成法为降低系统成本、提升系统可靠性带来了许多系统集成机会。

2.3 用一个自振高频振荡器与反馈变压器实现基于微变压器的信号和电源隔离法的应用

为了在隔离之间实现高效的电源传输，用一个自振高频振荡器来驱动电源变压器的原边，同时用高频肖特基二极管来提供整流直流电压。调节由次级控制器产生的 PWM 完成，该 PWM 通过一个反馈变压器以远低于振荡频率的频率来开启和关闭振荡器。

通过反馈变压器的反馈信号的工作方式与通过数据变压器的其它数据通道信号相同。当为能量转换和反馈设置不同的控制路径时，可以优化能量转换效率，同时维持调节的稳定性。基于微变压器的栅极驱动器不但功耗更低，而且可以具有匹配性更好的栅极驱动器时序特性，可以显著提高系统的总功率转换效率。隔离的信号和电源集成也可大幅减少元件数量，从而降低系统成本、提高可靠性。

2.4 隔离式半桥栅极驱动器提升太阳能逆变器效率

作为 iCoupler 数字隔离器技术与传统光耦合器中使用的 LED 和光电二极管不同，这种技术基于芯片级变压器，支持更高的数据速率，功耗更低，性能更加稳定。通过使用晶圆级工艺直接在片内制造变压器，iCoupler 数字隔离通道能以较低成本相互集成以及与其它半导体功能集成在一起。iCoupler 数字隔离器的变压器是由 CMOS 和镀金金属层组成的平面结构。位于镀金层下方的高击穿电压厚聚酰亚胺层，将顶部变压器线圈和底部变压器线圈隔离开来，从而提供最可靠的最高等级数字隔离性能。连接顶部线圈和底部线圈的 CMOS 电路用于提供每个变压器与其外部信号之间的接口。目前，已有超过 5 亿个隔离通道采用 ADI 公司的 iCoupler 数字隔离器技术，设计用于数百种应用，且应用领域仍在不断扩大。

应用 ADuM3223 和 ADuM4223 隔离式精密半桥栅极驱动器作为太阳能逆变器隔离就是典例。ADuM3223 和 ADuM4223 栅极驱动器内置两个独立隔离通道，采用 3.3V 至 5.5V 输入电压工作，使其与低电压系统相匹配。各路输出相对输入的连续工作电压高达 400Vrms。高低端之间的差分电压可能高达 700VPEAK，使这些器件非常适合在宽总线电压范围内提供可靠控制。它具有不到 55ns 的传播

延迟和不到 5ns 的延迟匹配，比采用相对低效光耦合器技术的栅级驱动器速度快 4 倍。该新型栅级驱动器能够满足 5kVrms 增强隔离安全标准，还能在驱动器的高低端输出之间提供 700VPEAK 的电流隔离，将交叉导通电位降至最低，并提升可靠性和设备安全。

该新型隔离式栅级驱动级明显提升了可靠性、切换速度和温度，封装尺寸也更小，从而带来更高的功率密度和总体电源效率。

3 结论

随着太阳能行业的快速发展，高频变压器隔离型的产品也发展迅猛。而在通信行业、电力行业，早在 10 年以前高频变压器隔离的产品技术早就完全取代了工频变压器隔离的产品（相控通信电源）。近两年全球太阳能并网逆变器的制造企业都在发展高频变并压器隔离的产品。高频变压器隔离的产品虽然研发周期长，技术难度高，但其有极大的优越性，节省铜材料，体积小、重量轻，而且还可以实现模块化分布式结构，使可用度达到 0.9999999。在保证系统高可用度（7 个 9）的情况下，单套光伏发电电子系统可以做的更大，如 40kW，50kW，100kW，200kW 等等。在未来一、二年的时间，高频变压器隔离的并网逆变器必将全面占领光伏并网逆变电源的市场。

需要指出的是，虽然工频变压器隔离型也可用在 PV 并网逆变电源中，但与高频变压器隔离型并网逆变电源相比较：高频隔离技术比工频隔离技术节省 98% 的铜材料，真正地实现节能减排，相同太阳能电池板及光照条件下的综合发电量，分布式模块化并网逆变电源系统比工频逆变器产品高 5%~10% 以上。

基于微变压器的隔离集成方法是满足并网 PV 逆变器、中央逆变器或微逆变器的隔离需求的理想解决方案。其集成式信号和电源隔离能力可以大幅减少元件数量，提高系统可靠性和使用寿命，同时，其精密的栅极驱动时序特性则可能进一步提高逆变器的效率。利用基于微变压器的隔离 ADC，可以对电网电流和电压进行更加准确的测量，结果给电网带来高品质的单位功率系数正弦电流。