

“光伏新贵” 微型逆变器及磁元件设计

纵浩

合肥艾克比电子科技有限公司, 合肥 231202

进入 21 世纪以来, 清洁能源取得了长足的进步, 全球光伏装机快速增长。未来在碳中和目标驱动下, 全球各国对光伏政策规划与支持将不断兑现。尤其是近几年, 智能电网的建设和发展, 又极大地推动了分布式光伏和微电网技术的普及。

以中国为例, 今年 7 月 29 日, 国家能源局公布了 2022 年上半年光伏发电建设运行情况, 其中, 上半年光伏新增装机 30.88GW, 集中式光伏电站 11.22GW, 分布式光伏 19.65GW。户用分布式光伏新增装机 8.91GW, 同比增长 51.5%。

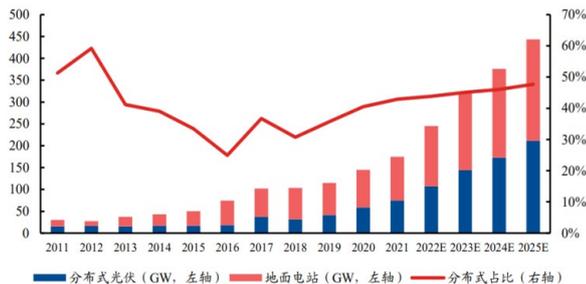


图 1 分布式光伏在全球光伏装机中的比重日益凸显

随着光伏发电市场的“井喷式”发展, 逆变器出货量不断攀升。逆变器是光伏系统中的重要组成设备, 只占系统总成本 8%-10%, 却直接影响发电效率, 运行稳定性和

使用寿命, 在整个光伏发电系统中占有重要地位。

一、微型逆变器成为“光伏新贵”

逆变器作为衔接光伏组件与电网的重要设备, 除了承担直流电转换的作用外, 其还能通过 MPPT 技术 (最大功率点跟踪) 让光伏板保持以最大功率进行工作。除了像“心脏”, 还像是光伏电站的“大脑”。

众所周知, 逆变器主要分为集中式、组串式和微型三类, 区分方式主要在于接入光伏组串的数量与最大支持功率。多年来, 集中式和组串式逆变器已经发展的已经很成熟, 于是行业领域内也在积极探索逆变器的未来发展方向。微型逆变器逐步成为了“超级新星”和杰出代表。

1. 微型逆变器是分布式光伏发电的绝佳选择

微型逆变器主要是针对传统逆变器在效率、安全、运维三个方面存在的痛点进行优化开发出来的。在使用微型逆变器的搭建方案中, 其系统电压为单组件电压, 而当直流系统中的电压在四五十伏左右时, 线端产生的直流拉弧便轻微很多, 从而在源头上解决了屋顶光伏高电压所带来的安全隐患。

除了在安全方面具有优势, 以单组件进行接入的微型逆变器还可以避免组串式系统中存在的“木桶效应”, 发电效率通常比采用传统逆变器的光伏电站高 5%-22%, 且运维也更加便捷。相比传统逆变器, 微型逆变器可以监控到单个组件的电压、电流、功率等信息, 通过布局图可以实

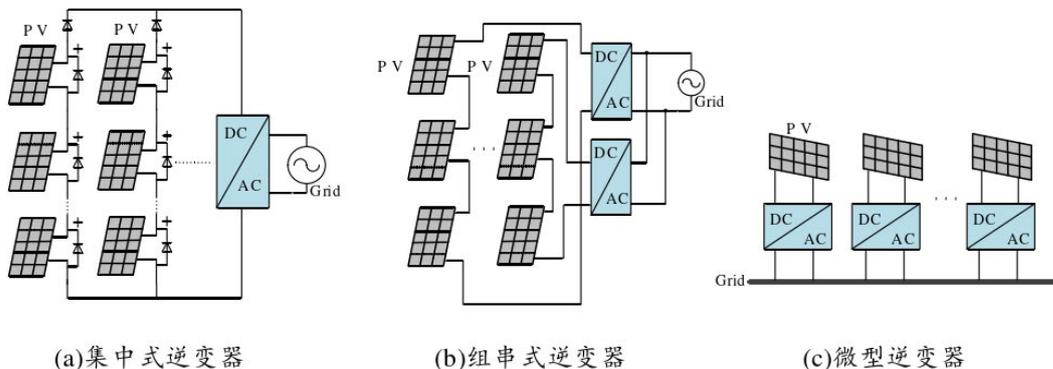


图 2 光伏逆变器的种类

现故障的精准定位, 并快速解决问题。

2. 微型逆变器市场前景非常广阔

随着太阳能在全球能源结构中的渗透率提升、分布式光伏在光伏装机中渗透率的提升和户用光伏在分布式光伏装机中渗透率的提升, 作为最适合户用光伏应用场景并且符合各国直流侧安全标准要求的微型逆变器将实现三重渗透下的高速成长。相关机构预测: 到 2025 年微型逆变器在分布式光伏领域的渗透率将超过 16%。出货量将超过 29GW, 年化复合增速近 70%, 市场空间超 450 亿元, 年化复合增速超 50%。

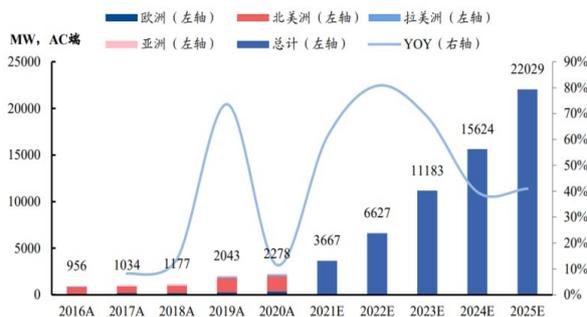


图 3 近几年全球逆变器出货量及预测

随着户用光伏渗透率的提升和电站直流侧安全标准的建立, 具备更安全和更高效特性的微型逆变器有望得到更加广泛的运用。

当前微型逆变器市场尚处 Enphase 一家独大局。在微逆市场扩大的大背景下, 国内企业有望凭借自身产品性价比和精准布局实现弯道超车, 复刻传统逆变器企业的国产替代之路。

二、微型逆变器效率优化

光伏并网发电系统的稳定性、使用寿命及转换效率与微型逆变器采用的电路结构息息相关。

1. 微型逆变器主电路的拓扑结构

微型逆变器主电路的拓扑结构, 根据母线类型大致分

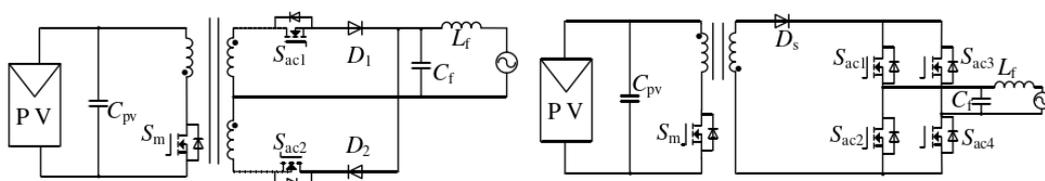


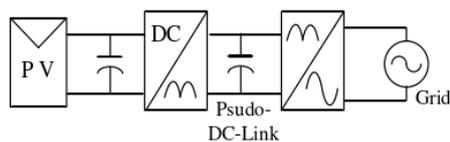
图 5 反激式微逆结构

为三类: 直流母线 (DC-Link)、无直流母线 (Without-DC-Link) 和伪直流母线 (Pseudo-DC-Link) 三种结构。

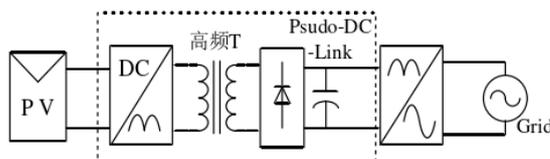
直流母线结构的不足之处在于: 前后级电路中开关管均工作高频状态以及二极管存在方向恢复, 这无形中增加了开关损耗、降低了逆变器效率。

无直流母线结构中引入谐振电路, 原边开关管可实现软开关技术, 能进一步是系统效率得到加强, 但电路设计变得复杂。其后级需要周波或矩阵变换器具有双向导通的能力, 这增加了开关管的使用量, 加大了控制的复杂度。同时, 开关管的电压应力及系统效率还会受到高频开关状态的影响。

伪直流母线结构的前级 DC-DC 电路是最关键的部分, 不仅完成升压和 MPPT, 还需将直流电调制成 100Hz 的馒头波; 后级 DC-AC 采用工频极性翻转电路, 将馒头波翻转为正弦并网电流, 最终完成并网。



(a)非隔离型



(b)隔离型

图 4 伪直流母线结构

该结构控制简单, 在前级输出侧可使用无极性电容, 提高逆变器使用寿命。但其级数太多, 导致使用到的元器件也比较多, 增加了逆变器成本。因此学者们提出了基于反激变换器 (Flyback Converter) 的结构, 如图 5 所示。

电路中变压器原边开关工作处于高频状态,可使用脉宽调制控制并网电流,副边开关处于工频状态,利用电网电压过零实现开关管交替疏通。可以看出,这种结构使用的器件较少,控制简单,体积变小了,成本也大大降低了。该电路适用于小功率场合,成为当前光伏微型逆变器的主流结构。

2. 反激式微型逆变器的关键技术

为了实现反激式微型逆变器低成本、高效率、高可靠性和寿命耐久等目标,国内外学者提出了MPPT控制、功率解耦、并网电流控制、软开关和孤岛检测等技术。从控制方法和拓扑结构来看,以下两种技术尤为关键。

(1) MPPT 控制技术

微型逆变器可以实现与光伏组件一一对应,能够真正意义上实现MPPT技术,完成太阳能到电能的最大效率传输。因此,在小功率的反激式光伏并网系统中,选择合适的MPPT控制对整个系统的效率和成本有很大影响。

近年来,基于人工智能的MPPT算法包括萤火虫、蚁群和粒子群等相继提出。针对DCM模式下的反激式微型逆变器的电流源特性,逐步发展出较多以扰动电流或开关管占空比的MPPT控制法,能够使光伏电池工作与MPP处。这类算法控制简单,成本较低。

(2) 功率解耦技术

单相光伏并网系统中,反激式微型逆变器输入功率由MPPT控制得到的是一个恒定值,但输出功率为一个二倍频的脉动值,这就导致光伏侧产生一个二倍频的功率扰动。现在学者们对反激式微型逆变器的拓扑结构进行改进,将带薄膜电容的有源功率解耦电路(APDC)加入到传统的微型逆变器当中。

薄膜电容由于其低容值和长寿命的优势,在微型逆变器的应用中得到很大的发展。

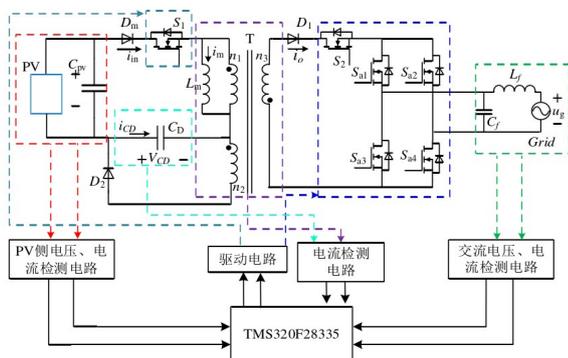


图6 反激式微逆系统硬件框架图

从硬件上来说,除了主控芯片以外,主要元器件还有主开关管、工频翻转电路开关管、副边整流二极管、解耦二极管等。从图7可以看出,微型逆变器的硬件结构分为变压器、电感线圈、薄膜电容和控制电路四个主要部分。



图7 实验用微逆调试平台

合肥艾克比电子科技有限公司是一家以电感器和变压器为主营产品的磁元件企业,多年来为国内外新能源企业供应不同规格型号的磁性元器件,在行业里具备一定的知名度。不同于传统逆变器,微型逆变器对磁元件的使用量较少。但微型逆变器追求效率和寿命兼得,所以对磁性元器件的品质要求极高。面对微逆市场蓬勃兴起,磁元件企业都紧盯着光伏产业这块大蛋糕。磁元件要迎合微逆市场需要,不断优化设计,确保质量,保证微逆产品品质,才能实现国产微型逆变器在国际上弯道超车,让中国品牌畅销世界。

限于学识和水平,本文仅讨论反激式微逆系统中的磁性材料,主要涉及高频变压器和磁环电感两类。

1. 微逆时代的磁性材料

微型逆变器中,开关变换器是重要的组件。而开关变换器的储能、电气隔离和能量转换,主要取决于变压器和

电感器。因此，磁性材料的选型和设计，直接决定了微型逆变器的性能和效率。现如今，高性能、高效率、小体积的开关电源日益受到青睐。

随着高频的升高，磁元件的发热问题日益严重。磁材对温度敏感，高温会导致磁损耗升高。从功率损耗来说，磁元件损耗包括铜损（流过绕组的电流在绕组上产生的热损耗）和铁损（磁芯损耗，如磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗）。

对于磁元件企业的工程师来说，掌握磁元件基本特性和磁芯损耗的物理非常重要，磁性材料的选取，决定着最终设计的性能优劣。如何设计出合理高效适用的磁性元件需要考虑的因素有很多，例如磁芯的形状、材料、磁芯的损耗以及气隙的影响等。



图 8 光伏微逆上使用的电感线圈与变压器

铁氧体是所有软磁材料中品种多、应用广且能很好满足开关变换器要求的，其工艺水平的提升也使得铁氧体的分类更加细化。锰锌铁氧体 (MnZn) 和镍锌铁氧体 (NiZn) 是两种最为常见的铁氧体，它们两者最大的区别在于工作频率范围不同。前者的电阻率更低，在 1MHz 频率范围内表现出更佳的性能；后者电阻率较高，在 1MHz 以上的工作频率场合下性能优异。

2. 电感器的磁材选型与设计

电感主要功能是储能、滤波、抑制 EMI 以及稳定电流。根据实际工作要求分为直流滤波电感、交流滤波电感、可饱和电感三大类。

直流滤波电感通常工作在直流电路中，按照滤除的信号进行划分又可进一步分为两类：整流滤波电感以及 EMI 滤波电感。整流滤波电感通常用来滤除整流电路输出侧的

交流纹波，通常和电容器搭配使用使整流侧输出更加平滑的直流电压。EMI 滤波电感主要用于抑制消除电路中电子设备间的电磁干扰，提高设备和系统的抗干扰能力和稳定性。EMI 电感选型时，需要充分考虑实际工作情况以及滤波频段，并且要做好隔离屏蔽处理。



图 9 艾克比电子的部分铁氧体电感器



图 10 艾克比电子的部分磁屏蔽扁线电感器

交流电路中存在许多的电压电流谐波，这些谐波会对电路的正常工作造成影响，交流滤波电感的存在就是为了降低交流电路中电压电流谐波分量给电路带来的影响。选取交流滤波电感时，要考虑到它的两大技术指标：电感值 L 和品质因数 Q。除此之外，考虑到电感上的电流谐波分量大小，在选取交流滤波电感时，要充分考虑到它的热稳定特性。

3. 变压器的选型与设计——以 RM14 为例

由 Flyback Converter 理论可知：主开关管处于关断状态时，其原边电感电压与导通时方向相反，等于输入电