

光伏微型逆变器拓扑结构研究与分析

汪 飞,徐新蔚,吴春华

(上海大学 机电工程与自动化学院 上海市电站自动化技术重点实验室,上海 200072)

摘要:与集中式和组串式光伏并网逆变器不同,微型逆变器通常连接单块光伏组件。由于光伏组件具有最大功率点跟踪控制、灵活的拓展性和更高的可靠性,近几年微型逆变器发展迅速,但也存在着稳定性、转换效率、功率密度、使用寿命和成本上的挑战。阐述了微型逆变器设计中的要求与挑战,根据能量变换级数和母线类型的不同,将现有微型逆变器电路拓扑结构分成4类,详细介绍了各类拓扑结构的优缺点。综合考虑不同拓扑结构下微型逆变器的电路复杂程度、控制的难易度、能量转换效率的大小、成本高低以及寿命长短等指标,给出了微型逆变器未来的发展方向。

关键词:光伏;微型逆变器;拓扑结构;直流母线;伪直流母线;高频母线

中图分类号:TM 464;TM 615

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.004

0 引言

光伏发电系统通常采用的是并网模式,将光伏组件发出的电能传输到电网中。根据直流侧光伏组件组合方式的不同,并网光伏发电系统一般可分为4种结构:集中式并网逆变系统、组串式并网逆变系统、多组串式并网逆变系统和模块式并网逆变系统^[1-5]。在模块式并网逆变系统中,每块光伏组件都与独立的DC-AC变换器相连接。由于该DC-AC变换器体积和重量相对较小,因此被称为微型逆变器(micro-inverter)或模块式逆变器(module integrated inverter)。

模块式逆变器的概念是由加州理工大学JPL实验室于20世纪70年代提出。受限于半导体开关管、微处理器的发展,直到1997年才由美国Solarex公司实现商用,推出240 W的微型逆变器产品^[6]。近几年微型逆变器发展迅速,特别是在小型民用光伏发电领域,正越来越多地侵蚀着组串式逆变器的市场份额。根据国际知名市场咨询公司IHS给出的报告,2013年全球微型逆变器的出货量为500 MW,2017年出货量预计为2 GW,微型逆变器累计装机容量将超过7 GW^[7]。我国作为光伏生产和年装机容量第一大国^[8],微型逆变器在国内市场具有很大的发展前景。

微型逆变器的输出功率通常低于500 W^[9],其与单块光伏组件组合在一起,独立跟踪每块光伏组件的最大功率点(MPP),是4种并网模式中最大功

率点跟踪(MPPT)效率最高的实现方案。借助模块化技术,微型逆变器做到了真正的即插即用(plug and play),易于系统的安装、后续变更和扩容升级,即使是不具备专业知识的用户也可以自行购买使用^[1]。与传统式并网逆变系统不同,微型逆变器系统中不含高压直流母线,提高了系统运行的安全性;可以通过电力载波通信等方式检测各个独立模块的工作状态,降低了后期维护成本^[10]。

更高的MPPT效率、更好的易用性、更低的安装成本、更高的安全性以及完善的实时监测性,使得微型逆变器成为未来光伏并网系统的发展方向之一^[11-13]。但是工业应用对更强稳定性、更长使用寿命、更高能量转换效率、更高功率密度和更低单位瓦数成本等的需求,给微型逆变器的设计带来了巨大的挑战。

为了概括工业应用和学术研究中微型逆变器最新的电路拓扑结构,本文从微型逆变器设计的要求出发,探讨了其设计难点,揭示了电路拓扑是微型逆变器设计的核心;根据能量变换级数和母线类型的不同,将微型逆变器的拓扑结构分成4类,详细介绍了4类不同微型逆变器的工作模式和优缺点;从稳定性、寿命、功率密度、能量转换效率和成本的角度出发,对不同拓扑结构下的微型逆变器进行对比分析和讨论,指出含直流母线的多级式电路拓扑结构将会是未来微型逆变器的发展方向。

1 微型逆变器设计要求及挑战

与组串式和集中式并网逆变器类似,微型逆变器同样是光伏组件和电网之间交互的核心,其必须同时满足组件侧的输出特性和电网侧并网标准的要求。又因其特殊的自身结构和安装模式,以及与传统式并网逆变器之间的竞争关系,故微型逆变器的设计存在着诸多挑战。

收稿日期:2017-01-22;修回日期:2017-10-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577113);上海市科委科技创新行动计划(17010500200)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577113) and the Science and Technology Innovation Action Plan, Shanghai Municipal Commission of Science and Technology(17010500200)

1.1 设计要求

1.1.1 组件侧要求

通过收集国外主要光伏厂家的产品资料,列出了各光伏组件在标准测试条件(STC)下的最大功率和MPP电压,如图1所示。可见,无论是薄膜还是晶硅材料,光伏组件的MPP电压都小于70 V。因此,微型逆变器必须先升压再逆变。另外,由于光伏电池输出的电压电流呈非线性,随着光照和温度等条件的变化,其工作在不同且唯一的MPP上,故要求后级的微型逆变器在实现电压升压的同时能够完成MPPT控制。

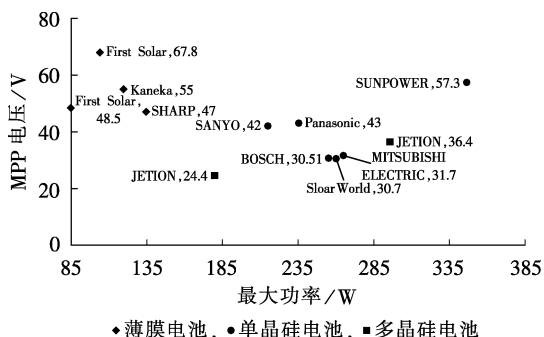


图1 最大功率和MPP电压

Fig.1 Maximum power and maximum power point voltage

除MPPT控制算法之外,光伏组件能量利用率也影响着并网逆变器的MPPT效率。根据文献[14]中的计算可知,在并网逆变系统中,要使光伏组件的利用率达到98%,组件侧的电压纹波必须小于8.5%。

1.1.2 并网侧要求

作为并网发电设备,微型逆变器必须遵循各个国家和地区的并网标准,常见的有IEEE 1547.2、VDEV 0126-1-1、VDE-AR-N 4105、IEC61727、NEC2008和EN50106^[1,5,15]。这些标准规定了分布式并网发电系统的并网电能质量、并网电流直流分量限定值、漏电流大小及对应的系统反应时间、正常工作时电网电压幅值和频率的范围、孤岛效应检测和系统接地等的要求。

除并网电流谐波之外,并网电流直流分量和漏电流也影响着电能质量的优劣。前者会导致配电变压器的饱和,加快铺地设备的腐蚀^[16];后者会导致传导损耗,降低电磁兼容性并可能产生人身安全问题^[17]。IEEE 1547.2标准限定总谐波畸变率(THD)小于5%,要求并网电流直流分量小于额定电流的0.5%,相比于VDE要求直流分量小于1 A和IEC要求直流分量小于额定电流的1%限定值更加严格。关于并网设备中漏电流大小的限定,国际上还没有形成统一的标准。但是,VDEV 1206-1-1明确规定了无变压器并网逆变器中的漏电流大小:若系统中

漏电流的均方根(RMS)值大于30 mA,则在0.3 s内必须切断系统^[18]。

在隔离型的并网逆变器中,变压器充当着升压角色的同时,实现了光伏组件和电网之间的电气隔离,消除了因直流电流分量和共模电流产生的隐患^[19]。但是在非隔离型的逆变器中,IEEE 1547.2限定最大直流电流注入量为0.5%和VDEV 1206-1-1规定最大漏电流为30 mA,给电路拓扑和控制策略设计带来了很大的挑战。

1.2 设计挑战

微型逆变器直接安装在光伏组件的背部或者是金属支撑架上(也有厂商将微型逆变器和光伏组件集成在一起),其直接暴露在室外,对逆变器工作的稳定性和系统的功率密度有很高的要求。由于光伏组件的寿命通常在25 a以上,为使微型逆变器的寿命和光伏组件匹配,如此高的使用年限给微型逆变器的设计带来了很大的挑战。

成本和效率往往被看作是微型逆变器中最重要参数,直接影响着经济效益。并网逆变器的成本通常采用每瓦数所消耗的资金来衡量,而效率采用国际上通用的欧洲效率 η_{EU} 或者CEC效率 η_{CEC} ,以代替传统的比较逆变器效率曲线的方法。

根据国际能源局光伏组织IEA-PVPS提供的2014年中国年度光伏发电应用报告可知,功率等级大于1 MW以上的光伏发电系统,并网逆变器的平均价格已经下降至0.32元/W;功率等级在10 kW以下的系统,并网逆变器的平均价格为1元/W^[20]。对比传统大功率并网逆变器,微型逆变器的市场价格过高,降低成本是各厂家和科研工作者亟待解决的问题,这也是微型逆变器设计中的挑战之一。为提升微型逆变器的竞争力,除降低成本之外,还需提高微型逆变器的效率。

通过收集2011年至2016年主流微型逆变器的产品资料,列出了国外各厂家产品性能指标,如表1所示。可见各微型逆变器产品的额定功率在250 W左右,最大功率密度、最小功率密度和平均功率密度分别为5.74 W/in³、1.79 W/in³和3.52 W/in³,最大峰值、CEC、欧洲效率分别为97.3%、95.4%和97%。需要注意的是,表1列出的10款微型逆变器,只有制造商Enecsys和Enphase的部分产品承诺提供大于20 a的质保。剩余半数的微型逆变器厂家没提及质保年限或者提供的质保年限较短,这一定程度上说明微型逆变器的寿命较短,不能实现和光伏板寿命匹配。

一般而言,逆变器功率越大,能量转换的效率也会越高。本文收集了去年全球市场出货量前三名厂家2014年到2016年最新产品的资料,在表2中列出了若干集中式、多组串式和组串式的并网逆变器

表 1 国外厂家近年主流微型逆变器产品的性能指标

Table 1 Performance indexes of mainstream latest micro-inverters produced by foreigner manufactures

制造商	型号	额定功率/W	功率密度/(W·in ⁻³)	峰值/欧洲/CEC 效率	质保年限/a
ABB	0.25-I-OUTD	250	1.79	96.5%/—/96.0%	10
Power-One	MICRO-0.25-I	250	1.85	96.0%/95.4%/95.5%	—
Enecsys	D360W-72-UL	360	4.02	—/—/95.5%	20
Enecsys	240-60-MP	260	3.37	96.4%/95.0%/96.0%	25
Enecsys	250NL	250	5.74	96.0%/94.5%/95.5%	25
Enphase	C250	250	3.77	96.5%/—/96.5%	2
Enphase	M250	250	4.62	96.5%/—/95.5%	25
Enphase	S230	230	3.58	97.2%/—/97.0%	25
Enphase	S280	280	4.36	97.3%/—/97.0%	25
Sunny Boy	240	230	2.13	95.8%/95.3%/—	—

表 2 全球并网逆变器领先厂家集中式和组串式逆变器产品的性能指标

Table 2 Performance indexes of central and string inverters produced by world leading manufactures

逆变器类型	制造商	型号	额定功率/kW	功率密度/(W·in ⁻³)	最大/欧洲/CEC 效率
集中式	ABB	PVS800-57-0500	500	2.07	98.6%/98.2%/—
集中式	ABB	PVS800-57-1200	1 000	4.13	98.8%/98.6%/—
集中式	华为	SUN8000-500KTL	500	3.21	98.7%/98.5%/—
集中式	SMA	500CP-US 600V	500	1.45	98.1%/—/97.5%
集中式	阳光	SG 1000HV	1 000	5.29	98.7%/98.5%/—
多组串式	ABB	TRIO-20.0-TL-OUTD	20	1.51	98.2%/—/97.5%
多组串式	ABB	PVI-5000-TL-OUTD	5	1.41	97.0%/96.4%/—
多组串式	华为	SUN2000-28KTL	28	5.67	98.7%/98.4%/—
多组串式	SMA	TRIPOWER 60-US	60	7.8	98.8%/98.0%/98.5%
多组串式	SMA	TRIPOWER 20000TL-US	20	2.87	98.5%/—/97.5%
多组串式	阳光	SG 60KTL-M	60	6.37	98.9%/98.6%/—
组串式	SMA	SUNNY BOY 6.0-US	6	1.28	97.6%/—/97.0%

性能指标。可见各传统并网逆变器的平均功率密度为 3.59 W/in³,与微型逆变器的平均功率密度几乎一致。但是,集中式和多组串式并网逆变器峰值效率几乎都高于 98%,甚至接近 99%,优于微型逆变器。

在功率密度指标上,微型逆变器和传统并网逆变器保持相同水平。但由于微型逆变器安装方式特殊,对功率密度要求苛刻,这成为了设计中的挑战之一。因为其特殊的安装方式带来的恶劣的工作环境,微型逆变器需要更高稳定性的软硬件基础,这成为了设计中的又一个挑战。无变压器设计是提升并网逆变器效率和功率密度,同时降低成本的一种方法^[21]。但是在微型逆变器应用中,非隔离型拓扑会导致高升压比实现更为困难。另外,电气隔离的缺失使得难以满足 IEEE 1547.2 标准中的直流分量限定和 VDE V 1206-1-1 标准中的漏电流限定^[22]。作为未来并网发电系统的发展趋势,必须不断提高工作稳定性、工作寿命、功率密度、能量转换效率,同时降低系统的成本,才能提升微型逆变器的竞争力。优化的电路拓扑结构、无电解电容的设计、无变压器

的设计、SiC 或者 GaN 器件的采用和高效的控制方法既是应对方案,也是设计的难点。

2 微型逆变器拓扑结构分类

电路拓扑结构在很大程度上决定了微型逆变器工作稳定性的好坏、寿命的长短、功率密度和能量转换效率以及成本的高低、无变压器设计中升压比和共模电流抑制能力的大小。

本文在总结学术论文和市场产品中主要出现的微型逆变器拓扑的基础上,从拓扑结构的整体性分析出发,综合考虑能量变换级数和母线类型的不同,将微型逆变器电路拓扑分为 4 种类型进行阐述,分别为:含直流母线的多级式、含伪直流母线的多级式、含高频母线的多级式和单级式结构。

2.1 含直流母线的结构

含直流母线的多级式非隔离型和隔离型微型逆变器的系统图分别如图 2 和图 3 所示。光伏组件侧直流电压通过 DC-DC 变换器升压到一定值的同时完成 MPPT,然后通过后级的 PWM 逆变器实现并网。功率解耦由母线电容 C_{bus} 完成,由于直流母线电压

较高,此处可采用薄膜电容作为解耦元件,以提高微型逆变器的寿命。另外,提升母线电压纹波耐受值可进一步降低电容值,但是电压外环须采用数组滤波器^[23]、自适应下垂^[24]、变母线电压^[25]等控制策略,以保证母线上的2倍频脉动电压不会影响并网电流质量。

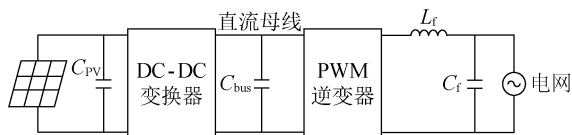


图2 含直流母线的多级式非隔离型微型逆变器系统框图

Fig.2 System block diagram of multi-stage non-isolated micro-inverter with DC bus

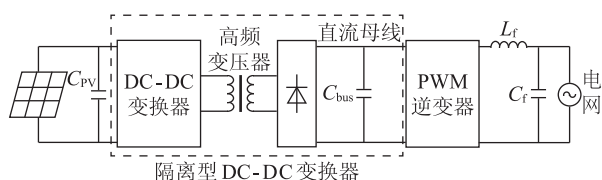


图3 含直流母线的多级式隔离微型逆变器系统框图

Fig.3 System block diagram of multi-stage isolated micro-inverter with DC bus

2.2 含伪直流母线的结构

含伪直流母线的多级式非隔离型和隔离型微型逆变器的系统图分别如图4和图5所示。实际电路中通常采用的是隔离式拓扑结构,前级的DC-DC变换器是核心环节,该部分将直流电转换成和电网同相的2倍工频电流馒头波的同时实现MPPT功能;后级的DC-AC环节是工频馒头波翻转电路,输出单位功率因数的并网电流,实现并网功能。该结构下微型逆变器的功率脉动一般采用输入侧解耦,如图4和图5中的 C_{pv} 所示。由于输入侧电压低、电压纹波要求高以保证光伏组件利用率^[14],因此该结构下通常采用电容值很大的电解电容,这极大地降低了微型逆变器的稳定性和工作寿命。

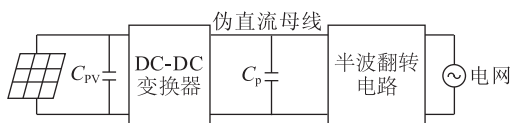


图4 含伪直流母线的多级式非隔离型微型逆变器系统框图

Fig.4 System block diagram of multi-stage non-isolated micro-inverter with pseudo DC bus

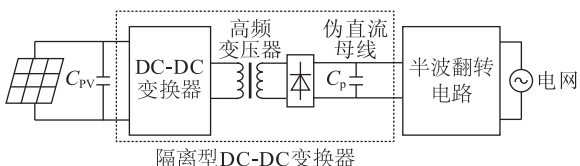


图5 含伪直流母线的多级式隔离型微型逆变器系统框图

Fig.5 System block diagram of multi-stage isolated micro-inverter with pseudo DC bus

2.3 含高频母线的结构

若不考虑图5中的整流二极管,并将后级工频翻转电路替换为交交变频器,可以得到含高频母线的多级式微型逆变器。前级DC-AC环节将组件侧直流电压转换成高频方波电压,通过高频变压器升压后,在后级交交变频器的作用下,输出单位功率因数的并网电流,实现并网。同样地,其解耦元件是利用1个或多个电解电容并联在光伏组件侧,降低了系统的稳定性和工作寿命。虽可采用交流侧解耦技术,降低电容值,但需增加额外的桥臂,控制方案复杂^[11]。

2.4 单级式结构

降低微型逆变器的能量变换级数是提升效率的手段之一。在小功率单级式并网逆变系统中,由于光伏侧的电压等级低,在DC-AC变换器后通常连接工频变压器^[26-27]。该设计通过改变变压器的匝数比实现逆变器输出电压和电网电压的匹配。但是工频变压器体积大、效率低,与微型逆变器高功率密度、高能量转换效率的发展方向矛盾。因此,单级式微型逆变器常采用无变压器的设计,其DC-AC环节必须是具有升压功能的逆变器,如Buck-Boost逆变器^[28]、双Boost逆变器^[29]和Z源逆变器^[30]等。

3 含直流母线的多级式微型逆变器

传统的两级式含直流母线的微型逆变器电路拓扑结构,前级采用Boost变换器,后级采用全桥逆变器,直流母线电压通常被控制在380~450V。由于单块光伏组件输出电压低,为25~50V,当Boost电路工作在高升压比下时,占空比接近于1,会导致转换效率低下^[31]。高升压比的DC-DC变换器,可通过采用耦合电感^[32-33]、开关电容模块^[34-36]以及耦合电感与开关电容组合等方案^[37-38]来实现。另外,也可以对传统的Boost电路进行改造,使其能工作在高升压比模式^[39-40]。

文献[39]提出了一种新型的微型逆变器电路拓扑结构,前级DC-DC环节采用单向Boost双半桥DC-DC变换器,后级采用全桥逆变电路。文献[41]首次提出Boost双半桥DC-DC变换器,该变换器集成了Boost电路和双半桥电路,实现了高升压比、电源隔离和能量双向流动的功能。文献[42]利用二极管取代变压器二次侧半桥电路的全控器件,得到单向Boost双半桥DC-DC变换器。为进一步提升前级DC-DC变换器的升压比,文献[40]利用2个Boost电路交错并联控制,后级采用与文献[39]中一致的全桥拓扑。在保证并网电流质量的前提下,对电压外环采用补偿控制以增加母线电压二次纹波的耐受值,减小了电容值,使薄膜电容的利用成为可能。减小开关损耗,使DC-DC变换器和逆变器工作

在软开关的模式下,是提高微型逆变器效率的一种方式。文献[43]提出一种由含 LLC 谐振变换器和全桥逆变器组成的微型逆变器,其前级 LLC 谐振电路可实现开关管的零电压导通,后级全桥逆变器采用混合脉宽调制(PWM)^[44],其中 1 个桥臂开关管工作在工频模式下,另外 1 个桥臂工作在 PWM 模式下。由于任何时候回路中只有 1 个开关管高频导通,所以采用混合 PWM 模式提高了逆变器的效率。结合文献[45]提出的一种在不增加额外电路的情况下对全桥逆变器的软开关控制策略,可实现高频开关管的零电压导通,进一步提升文献[43]中的微型逆变器的效率。

上述 3 种含直流母线的多级式微型逆变器的 DC-DC 环节都是采用全桥式逆变器,重点在于实现更高效率、更高变比的 DC-DC 变换器。为进一步优化微型逆变器的整体性能,提升系统的效率和稳定性,后级逆变电路可以采用双 Buck 逆变器。与全桥逆变器相比,双 Buck 逆变器不存在桥臂直通的问题,消除了死区对并网电流质量的影响;电感电流续流阶段不流经开关管的反并联二极管,使采用高开关频率的 MOSFET 成为可能^[2]。近年来对双 Buck 逆变电路的研究越来越多^[46-47],也出现了有关双 Buck 逆变器的工业产品^[48-50]。Power One 与 ABB 公司生产的微型逆变器产品正是采用了双 Buck 逆变电路作为 DC-AC 环节^[51]。文献[52]提出的微型逆变器前级 DC-DC 环节为有源箝位的反激变换器,并在变压器的副边加入了串联谐振倍压电路,回收变压器原边的漏感能量,同时还提升了 DC-DC 变换器的升压比;后级为简易型的双 Buck 逆变电路,其工频换向管是利用晶闸管代替 MOSFET,降低了系统成本。

在含直流母线的多级式微型逆变器中,采用无变压器的设计是未来的发展方向之一,通常可实现更高的效率、更高的功率密度和更低的成本。但是,DC-DC 环节升压比的限制和共模电流的出现给设计带来了挑战,使得非隔离式微型逆变器中的 DC-DC 变换器效率通常低于隔离式中的 DC-DC 变换器。文献[53]提出了非隔离式微型逆变器的拓扑结构,其额定功率为 150 W,前级是含耦合电感的高增益 DC-DC 变换器,后级是半桥式逆变器。由于前级 DC-DC 变换器输出为双极型电压,而后级为半桥式逆变器,因此组件侧地和电网侧地天然地连接在一起,消除了共模电流的隐患。该微型逆变器前级 DC-DC 变换器的峰值效率为 96.2%,达到了较高水平。

4 含伪直流母线的多级式微型逆变器

含伪直流母线的多级式微型逆变器拓扑结构,

前级通常采用反激式变换器,以实现 MPPT 控制和生成单位功率因数的馒头波电流;后级的全桥电路将馒头波电流翻转正弦波以实现并网。该拓扑结构可通过改变变压器的匝数来实现高电压增益。由于含伪直流母线的多级式微型逆变器由反激电路推演而来,因此也称为反激式逆变器。带中心抽头和含有双反激变换器的电路拓扑是学术上研究最广泛的含伪直流母线的微型逆变器拓扑。

基于带中心抽头的微型逆变器一般工作在连续导通模式(DCM)下,但 DCM 对开关管的电流应力要求高。文献[54]基于带中心抽头的微型逆变器提出了连续电流模式(CCM),降低了开关管的电流应力,提高了系统的效率。文献[55]实现了临界导通模式(BCM)和 DCM 相混合的工作模式,优化了系统效率并提升了系统的功率密度。文献[56]提出采用全面的设计方法优化了上述拓扑结构下微型逆变器的加权效率(CEC 效率、欧洲效率)。文献[57]通过将变压器副边的二极管替换为 MOSFET,形成双向导通的开关管,允许电流反向流通,实现了主开关管的零电压导通。

含有 2 个独立的反激式变换器的微型逆变器,通过采用交错并联主从控制,既提高了系统的功率等级,又改善了系统的效率^[58]。文献[59]在损耗分析的基础上,优化了控制模式,进一步提高了系统效率。

含伪直流母线的多级式微型逆变器的解耦电容一般在光伏组件侧,其电容值较大。文献[60-61]提出了带功率解耦端口的微型逆变器电路拓扑。该拓扑通过第 3 个端口实现功率解耦,极大地减小了光伏组件侧电容值,使得薄膜电容的利用成为可能。在不增加额外功率解耦端口的前提下,文献[62]通过增加能量变换级数,将解耦电容设置在高压侧,同样可以采用电容值较小的薄膜电容。但是多加入的能量变换级数会使得该微型逆变器的整体效率下降,系统的最大效率只有 89%。

5 含高频母线的多级式微型逆变器

对于含高频母线的多级式电力电子变换器的学术研究已有多年的^[63]。文献[64]首次提出了该拓扑结构下的逆变器,通常将其应用于不间断电源(UPS)中^[65]。文献[66-67]将其应用于光伏并网发电,但由于后级的交交变频器控制复杂,含高频母线的并网逆变器实用性低。为简化含高频母线的多级式并网逆变器的控制,文献[68]提出采用多载波 PWM 技术,使得交交变频器桥臂输出电压的波形类似于桥式 PWM 逆变器桥臂。基于此,文献[69]运用多载波 PWM 技术做了详细分析和建模,指出基于交交变频器的含直流母线的多级式逆变器同样适

用于小功率光伏发电^[70]。文献[70]将文献[69]提出的小功率逆变器应用到微型逆变器中,借助三端口脉动功率解耦思想,极大地减小了解耦电容值,减轻了前级推挽逆变电路开关管的电流应力,降低了开关管的开通损耗,但是解耦电路也会增加额外的损耗。文献[71]提出了一种基于半波式交交变频器的含高频母线的微型逆变器电路拓扑。该电路拓扑的前级和文献[70]提出的一致,都是推挽式逆变器,但后级为半波式交交变频器。半波式交交变频器比全桥型减少了4个开关管,但变压器副边的匝数增加了1倍,且需加入中心抽头。对额定功率为230 W的微型逆变器的损耗分析和计算结果表明,其最高能量转换效率可以达到96.1%。同样地,该电路拓扑也可采用三端口功率解耦电路以减小解耦电容值。文献[72]提出了一种基于全桥逆变器和半波式交交变频器的微型逆变器,其利用变压器原边LC串联谐振电路并采用脉冲频率调制(PFM)方式,以实现开关管的零电压开通。文献[73]在此电路拓扑的基础上,将后级的交交变频器改为全桥式结构,并采用移相调制解决了PFM导致的输出电流谐波频谱宽、滤波困难的难题。为减少开关管的使用,文献[74]提出了原边为全桥逆变器和串联LC谐振电路,副边为半桥式交交变频电路的微型逆变器。

上述含高频母线的多级式微型逆变器的前级DC-AC环节要么采用的是推挽式结构^[69,70-71],要么是全桥式结构^[72-74]。文献[75]基于一种新型的半波式交交变频器,对采用不同前级电路的组合做了对比分析。综合考虑效率和成本可得,基于半桥式逆变器的拓扑结构是最佳设计方案,其峰值效率为93.4%。

6 单级式微型逆变器

文献[29]提出了双Boost并网逆变器,其电路拓扑由左右2个双向Boost变换器以输入并联、输出串联的方式组成,其网侧电压为2个独立的Boost变换器输出电压的差值。双Boost并网逆变器通过控制使得2个Boost变换器输出具有相同直流偏置、相位相差180°的单极性正弦电压,从而在并网端产生正弦交流电压。与传统的单相全桥并网逆变器相比,其输出电压的幅值可以大于直流侧电压,这降低了系统对光伏侧电压的要求,应用范围更广。但在微型逆变器应用中,组件侧电压为25~50 V,为实现和220 V电网的并网,Boost工作在高升压比下,系统效率低。文献[76]提出一种基于双Boost逆变器的含耦合电感的微型逆变器,利用耦合电感代替Boost变换器中的主电感。输入电压等级低时,通过调高耦合电感的匝数比以实现并网,克服了传统双

Boost并网逆变器工作在高升压比下效率低的缺点。虽然文献[29]和[76]提出的拓扑为微型逆变器的应用提供了1个不错的方案,但是基于双Boost逆变器的电路拓扑中含有电流环流,降低了系统的效率。另外,高压侧电容仅起到输出滤波作用,2倍频功率脉动只能通过光伏组件侧电容 C_{PV} 解耦,导致 C_{PV} 值过大。

为抑制基于双Boost的并网逆变器中电流环流和解耦电容值过大的问题,文献[77]提出了一种改进型的单相全桥逆变器,其电路拓扑含有额外的2个二极管和1个共用电感,以形成2个Boost变换器,实现升压逆变的功能。该并网逆变器中功率解耦由直流母线上的电容实现,对比文献[29]和[76]中的拓扑,该拓扑下电容值较小,可采用寿命高、稳定性好的薄膜电容。参考文献[29]和[76]中的思路,文献[78]提出额定功率为200 W含耦合电感的基于单级式升压型逆变器的微型逆变器,进一步提升了系统的升压比。当电网电压有效值为110 V,输入侧电压为48 V时,其峰值效率为89.3%^[78]。

7 分析与比较

本文根据微型逆变器电路拓扑中能量变换级数和母线类型的不同,将其划分为含直流母线的多级式、含伪直流母线的多级式、含高频母线的多级式和单级式4种结构。下文对采用不同电路拓扑结构的微型逆变器的优缺点进行详细分析。

a. 含有直流母线的微型逆变器由于前级和后级电路的开关管都工作在高频调制模式下,因此必须采用软开关技术以降低开关管的开通损耗,提升系统效率。非隔离设计是提升能量转换效率、提高功率密度和降低成本的常见手段,但是变压器的缺失会导致DC-DC变换器设计困难,高升压比工作模式下的DC-DC变换器效率往往不高,影响了系统整体效率。该类微型逆变器的解耦电容可置于高压直流母线上,也可通过改进控制策略来提高母线电压纹波限定值,以进一步降低解耦电容值,可利用薄膜电容作为解耦元件,提升系统的稳定性和寿命。

b. 含伪直流母线的微型逆变器由于只有前级的DC-DC电路工作在高频PWM调制模式下,而后级的DC-AC环节工作在工频驱动下,因此也将称其为单级式逆变器^[11,79]。因为只有前级工作在高频驱动下,所以含伪直流母线的微型逆变器开关管的开通损耗较小,系统效率相对较高。但是该微型逆变器解耦电容只能置于光伏组件侧,为保持输入侧电压的稳定,通常采用电容值很大的电解电容作为功率解耦元件,这极大地降低了系统的稳定性和工作寿命。虽然可以增加额外的功率解耦电路以减小解耦电容的大小,但是这往往会降低系统整体效率。

c. 相比于含伪母线的结构,采用高频母线的微型逆变器不考虑中间级的整流环节,可以提高效率。但是由于交变变频器控制复杂且需要双向导通器件,成本高,降低了该微型逆变器的市场竞争力。在这种拓扑结构中,功率解耦电容一般置于输入侧,也会导致电容值较大。

d. 采用单级式微型逆变器可降低能量变换级数,减少半导体开关器件的使用,理论上转换效率会更高。但是微型逆变器的直流侧输入电压低,要实现和220 V电网的并网,如此高的升压比对电路拓扑限制大,或多或少地降低了其转换效率。另外,电

压升压、MPPT和并网控制都要在同一级内完成,使得电路参数之间耦合性强,控制复杂。

表3列出了上述12种具有代表性的微型逆变器的主要参数和性能指标。其中效率参数来自于各文献中的实验数据以及工业产品技术资料中的说明。由于表中各微型逆变器的额定功率、输入电压范围和并网电压并不完全一致,所列效率参数仅供对比参考。从表3中可以看出,含有直流母线的微型逆变器,其解耦电容都置于直流母线侧,此类拓扑易于采用电容值低的薄膜电容。另外,该类拓扑的额定功率也高于其他3种结构。

表3 基于不同拓扑结构的微型逆变器关键参数

Table 3 Key parameters of micro-inverters based on different topologies

微型逆变器	拓扑类型	额定功率/W	输入/并网电压有效值/V	最小元器件数目				解耦电容位置	效率/%
				变压器绕组	开关管	二极管	主电感		
文献[39]	含直流母线	210	50/180	2	6	9	2	母线侧	—
文献[40]	含直流母线	230	—/220	2	6	8	3	母线侧	92.18(C)
文献[43]	含直流母线	250	—/220	2	8	12	2	母线侧	95.8(M)*
文献[51]	含直流母线	250	25~60/240	4	6	12	2	母线侧	96.0(M)
文献[52]	含直流母线	400	45~75/220	2	6	8	2	母线侧	96.2(M)
文献[53]	含直流母线	150	48.7/220	0	3	8	4	母线侧	94.3(M)*
文献[55]	含伪直流母线	200	40/230	3	3	5	0	光伏组件侧	90.8(M)
文献[61]	含伪直流母线	100	60/110	4	4	9	1	解耦电路中	90.6(M)
文献[62]	含伪直流母线	150	35/230	2	9	18	2	高压侧	89.0(M)
文献[74]	含高频母线	100	40/230	2	8	8	2	光伏组件侧	—
文献[75]	含高频母线	250	30~48/110	3	6	6	2	光伏组件侧	93.4(M)
文献[78]	单级式	200	35~48/110	0	4	7	3	高压侧	89.3(M)

注:C表示CEC效率,M表示峰值效率,*表示预估值,“—”表示文献中缺失该数据,文献[52]为工业产品。

8 结论

更高的MPPT效率、更好的易用性、更低的安装成本、更高的安全性以及完善的实时监测性,使微型逆变器成为光伏并网发电系统的重要组成部分。本文按照含直流母线的多级式、含伪直流母线的多级式、含高频母线的多级式和单级式的分类方式,分析了多种微型逆变器的电路拓扑结构,阐述了不同微型逆变器的优缺点。

含伪直流母线的多级式微型逆变器由于控制简单、效率较高,一直是研究热点。但是该类微型逆变器不可避免地大电容值的电解电容作为功率解耦元件,在降低系统的功率密度的同时还影响其工作寿命。另外,含高频母线的多级式和单级式的微型逆变器,其成本较高、控制复杂,在工业应用中较少。

而对于含直流母线的多级式微型逆变器,由于其稳定性好、能量转换效率和功率密度较高、寿命长、功率大,将会是未来微型逆变器的发展方向。并

且随着高效率、高升压比DC-DC变换器研究的不断深入,非隔离式的拓扑也将会成为未来微型逆变器的主流。

参考文献:

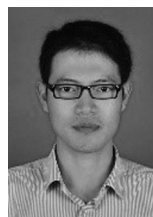
- [1] KJAER S B, PEDERSEN J K, BLAABJERG F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [2] ARAÚJO S V, ZACHARIAS P, MALLWITZ R. Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(9): 3118-3128.
- [3] 曾正, 杨欢, 赵荣祥, 等. 多功能并网逆变器研究综述[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 5-15.
ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang, et al. Overview of multi-functional grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 5-15.
- [4] 骆林松, 田慧欣, 吴凤江. 面向欧洲效率增强的在线拓扑可变速光伏发电并网逆变系统[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 94-99.
LUO Linsong, TIAN Huixin, WU Fengjiang. Grid-connected inverter system with online variable topology to enhance European efficiency

- for PV generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 94-99.
- [5] 汪飞,雷志方,梁东,等. 单相逆变器低频脉动电流抑制机理分析与方法综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 184-191.
WANG Fei, LEI Zhifang, LIANG Dong, et al. A review of mechanism analysis and methods of eliminating low frequency ripple current in a single-phase inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 184-191.
- [6] WILLS R H, KRAUTHAMER S, BULAWKA A, et al. The AC photovoltaic module concept[C]//Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Honolulu, USA: IEEE, 1997: 1562-1563.
- [7] GILLIGAN C. Record results from enphase, and the release of SMA's solar microinverter in Europe will help fuel over 2 GW of solar microinverter shipments in 2017[EB/OL]. [2017-01-28]. <https://technology.ihs.com>.
- [8] IEA-PVPS. Trends 2015 in photovoltaic applications, executive summary[R]. St Ursen, Switzerland: International Energy Agency, Photovoltaic Power System Programme, 2015.
- [9] LI Q, WOLFS P. A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1320-1333.
- [10] 张哲. 模块化光伏并网系统中微型逆变器和功率优化器结构和控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
ZHANG Zhe. Research on system structure and control strategies of micro-inverter and power optimizer for module-level photovoltaic grid-connected system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [11] HU H, HARB S, KUTKUT N, et al. A review of power decoupling techniques for microinverters with three different decoupling capacitor locations in PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2711-2726.
- [12] 李威辰, 陈桂鹏, 崔文峰, 等. 模块化光伏并网逆变器的线性功率控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 157-165.
LI Weichen, CHEN Guipeng, CUI Wenfeng, et al. Linear power control for modular photovoltaic grid-connected inverter system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 157-165.
- [13] 陈继洪, 洪峰. 一种新型的正激并网微逆变器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 286-294.
CHEN Jihong, HONG Feng. A novel forward grid-connected micro-inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 286-294.
- [14] KJAER S B. Design and control of an inverter for photovoltaic applications[D]. Aalborg, Denmark: Aalborg University, 2005.
- [15] VDE. Power generation systems connected to the low-voltage distribution network, technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks[S]. [S.l.]: VDEAR-N-4105, 2011.
- [16] 杨亮, 苏剑, 刘海涛, 等. 单相并网逆变器的直流分量抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 145-150.
YANG Liang, SU Jian, LIU Haitao, et al. DC component suppression strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 145-150.
- [17] 肖华锋. 光伏发电高效利用的关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
XIAO Huafeng. Research on the key technologies for high-efficiency utilization of photovoltaic generators[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [18] VDE. Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid[S]. Berlin, Germany: VDE V 0126-1-1, 2006.
- [19] GUBIA E, SANCHIS P, URSUA A, et al. Ground currents in single-phase transformerless photovoltaic systems[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2007, 15(7): 629-650.
- [20] IEA-PVPS. National survey report of PV power application in China 2014[R]. St Ursen, Switzerland: International Energy Agency, Photovoltaic Power System Programme, 2015.
- [21] KERKES T, TEODORESCU R, RODRIGUEZ P, et al. A new high-efficiency single-phase transformerless PV inverter topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 184-191.
- [22] 胡存刚, 姚培, 张云雷, 等. 高效非隔离单相并网 MOSFET 逆变器拓扑及控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 82-91.
HU Cungang, YAO Pei, ZHANG Yunlei, et al. Topology and control strategy for high-efficiency non-isolated single-phase grid-connected MOSEFT inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 82-91.
- [23] 郭晓瑞. 光伏并网逆变系统控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
GUO Xiaorui. Research on control strategies of grid-connected photovoltaic inverter systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [24] EREN S, PAHLEVANI M, BAKHSHAI A, et al. An adaptive droop DC-bus voltage controller for a grid-connected voltage source inverter with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 547-560.
- [25] HU Y, DU Y, XIAO W, et al. DC-link voltage control strategy for reducing capacitance and total harmonic distortion in single-phase grid-connected photovoltaic inverters[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(8): 1386-1393.
- [26] KERN G, RUSSELL M. Cost reduction and manufacture of the Sun-Sine® AC module[R]. Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory Report, 2001.
- [27] HO B M T, CHUNG S H. An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 953-962.
- [28] WANG C M. A novel single-stage full-bridge Buck-Boost inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 150-159.
- [29] CACERES R O, BARBI I. A Boost DC-AC converter: analysis, design, and experimentation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(1): 134-141.
- [30] PENG F Z. Z-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 504-510.
- [31] ROBERT W E, DRAGAN M. Fundamentals of power electronics[M]. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001: 49.
- [32] QUN Z, LEE F C. High-efficiency, high step-up DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 65-73.
- [33] WU T F, LAI Y S, HUNG J C, et al. Boost converter with coupled inductors and Buck-Boost type of active clamp[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 154-162.
- [34] CHUNG H S, IOINOVICI A, WAI-LEUNG C. Generalized structure of bi-directional switched-capacitor DC/DC converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(6): 743-753.
- [35] LAW K K, CHENG K W E, YEUNG Y P B. Design and analysis of switched-capacitor-based step-up resonant converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2005, 52(5): 943-948.

- [36] WU G, RUAN X, YE Z. Nonisolated high step-up DC-DC converters adopting switched-capacitor cell [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 383-393.
- [37] RONG-JONG W, ROU-YONG D. High step-up converter with coupled-inductor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(5): 1025-1035.
- [38] SATHYAN S, SURYAWANSHI H M, BALLAL M S, et al. Soft-switching DC-DC converter for distributed energy sources with high step-up voltage capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7039-7050.
- [39] JIANG S, CAO D, LI Y, et al. Grid-connected Boost-half-bridge photovoltaic microinverter system using repetitive current control and maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4711-4722.
- [40] CHIU H J, LO Y K, CHUANG C C, et al. A module-integrated isolated solar micro-inverter without electrolytic capacitors[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2014, 42(6): 572-583.
- [41] HUI L, PENG F Z, LAWLER J. Modeling, simulation, and experimental verification of soft-switched bi-directional DC-DC converters [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. Anaheim, USA: IEEE, 2001: 736-742.
- [42] YOON C, KIM J, CHOI S. Multiphase DC-DC converters using a Boost-half-bridge cell for high-voltage and high-power applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 381-388.
- [43] ZHAO Y, WEI T, HU H, et al. A high-efficiency PV grid-tied micro-inverter with soft switching for DC/AC stage[C]//2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Auckland, New Zealand: IEEE, 2015: 1150-1154.
- [44] RAY-SHYANG L, NGO K D T. A PWM method for reduction of switching loss in a full-bridge inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(3): 326-332.
- [45] ZHANG Q, HU H, ZHANG D, et al. A controlled-type ZVS technique without auxiliary components for the low power DC/AC inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3287-3296.
- [46] CHEN B, GU B, ZHANG L, et al. A high-efficiency MOSFET transformerless inverter for nonisolated microinverter applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3610-3622.
- [47] CHO Y W, CHA W J, KWON J M, et al. Improved single-phase transformerless inverter with high power density and high efficiency for grid-connected photovoltaic systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(2): 166-174.
- [48] Power-one. Datasheet of AURORA MICRO-0. 25-I [EB/OL]. [2017-01-28]. <http://www.power-one.com>.
- [49] ABB. Datasheet of MICRO-0. 25/0. 3/0. 3HV-I-OUTD [EB/OL]. [2017-01-28]. <http://www.ABB.com>.
- [50] MANISH BHARDWAJ S C. Digitally controlled solar micro inverter using C2000 piccolo microcontroller [R]. Dallas, USA: TI User's Guide, 2014.
- [51] GU B. Power converter and control design for high-efficiency electrolyte-free microinverters [D]. Blacksburg, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2013.
- [52] CHA W J, CHO Y W, KWON J M, et al. Highly efficient microinverter with soft-switching step-up converter and single-switch-modulation inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3516-3523.
- [53] ARSHADI S A, POORALI B, ADIB E, et al. High step-up DC-AC inverter suitable for AC module applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 832-839.
- [54] LI Y, ORUGANTI R. A low cost flyback CCM inverter for AC module application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1295-1303.
- [55] CHRISTIDIS G C, NANAKOS A C, TATAKIS E C. Hybrid discontinuous/boundary conduction mode of flyback microinverter for AC PV modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4195-4205.
- [56] NANAKOS A C, TATAKIS E C, PAPANIKOLAOU N P. A weighted-efficiency-oriented design methodology of flyback inverter for AC photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(7): 3221-3233.
- [57] SUKESH N, PAHLEVANINEZHAD M, JAIN P K. Analysis and implementation of a single-stage flyback PV microinverter with soft switching[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4): 1819-1833.
- [58] ZHANG Z, CHEN M, CHEN W, et al. Analysis and implementation of phase synchronization control strategies for BCM interleaved flyback microinverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5921-5932.
- [59] ZHANG Z, HE X F, LIU Y F. An optimal control method for photovoltaic grid-tied-interleaved flyback microinverters to achieve high efficiency in wide load range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5074-5087.
- [60] 胡海兵, 黄霄驳, 王万宝, 等. 具有功率解耦功能的三端口反激式单级光伏微型逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 47-54.
- HU Haibing, HUANG Xiaobo, WANG Wanbao, et al. A PV micro-inverter based on three-port flyback with power decoupling function [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 47-54.
- [61] HU H, HARB S, FANG X, et al. A three-port flyback for PV micro-inverter applications with power pulsation decoupling capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3953-3964.
- [62] RODRIGUEZ C, AMARATUNGA G A. Long-lifetime power inverter for photovoltaic AC modules[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2593-2601.
- [63] RANGANATHAN V T, ZIOGAS P D, STEFANOVIC V R. A regulated DC-DC voltage source converter using a high frequency link[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1982, IA-18(3): 279-287.
- [64] KAWABATA T, HONJO K, SASHIDA N, et al. High frequency link DC/AC converter with PWM cycloconverter [C]//Industry Applications Society Annual Meeting. Seattle, USA: IEEE, 1990: 1119-1124.
- [65] DE D, RAMANARAYANAN V. Improved utilisation of an HF transformer in DC-AC application [J]. IET Power Electronics, 2011, 4(5): 508-515.
- [66] BERISTAIN J, BORDONAU J, GILABERT A, et al. Synthesis and modulation of a single phase DC/AC converter with high-frequency isolation in photovoltaic energy applications [C]//2003 IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference. Acapulco, Mexico: IEEE, 2003: 1191-1196.
- [67] KEYHANI H, TOLYAT H A. Single-stage multistring PV inverter with an isolated high-frequency link and soft-switching operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 3919-3929.
- [68] KREIN P T, BALOG R S, XIN G. High-frequency link inverter for fuel cells based on multiple-carrier PWM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1279-1288.

- [69] AGANZA-TORRES A, CÁRDENAS V. Analysis and modelling of HF-link cycloconverter based inverter for low-power renewable energy sources applications [C] // 2011 8th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control. Merida City, Mexico: IEEE, 2011: 1-6.
- [70] 张晓锋, 夏益辉, 乔鸣忠, 等. 矩阵变换器间接空间矢量逆级联调制策略优化设计 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 40-44. ZHANG Xiaofeng, XIA Yihui, QIAO Mingzhong, et al. Optimal design of indirect space-vector over-modulation strategy for inverter stage of matrix converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 40-44.
- [71] AGANZA-TORRES A, CÁRDENAS V, PACAS M, et al. An efficiency comparative analysis of isolated multi-source grid-connected PV generation systems based on a HF-link micro-inverter approach [J]. Solar Energy, 2016, 127: 239-249.
- [72] TRUBITSYN A, PIERQUET B J, HAYMAN A K, et al. High-efficiency inverter for photovoltaic applications [C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Atlanta, USA: IEEE, 2010: 2803-2810.
- [73] KRISHNASWAMI H. Photovoltaic microinverter using single-stage isolated high-frequency link series resonant topology [C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Phoenix, USA: IEEE, 2011: 495-500.
- [74] NAYANASIRI D R, VILATHGAMUWA D M, MASKELL D L. Half-wave cycloconverter-based photovoltaic microinverter topology with phase-shift power modulation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2700-2710.
- [75] RATHORE A, SURAPANENI R, YELAVERTHI D. Cycloconverter based double-ended micro-inverter topologies for solar photovoltaic AC microsource module [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1354-1361.
- [76] FANG Y, MA X. A novel PV microinverter with coupled inductors and double-Boost topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3139-3147.
- [77] RIBEIRO H, PINTO A, BORGES B. Single-stage DC-AC converter for photovoltaic systems [C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Atlanta, USA: IEEE, 2010: 604-610.
- [78] ABRAMOVITZ A, ZHAO B, SMEDLEY K M. High-gain single-stage Boosting inverter for photovoltaic applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3550-3558.
- [79] MENESES D, BLAABJERG F, GARCIA O, et al. Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2649-2663.

作者简介:



汪飞

汪飞 (1981—), 男, 江西景德镇人, 副教授, 博士, 研究方向为新能源发电、电能质量控制技术与微电网技术 (E-mail: f.wang@shu.edu.cn);

徐新蔚 (1993—), 男, 浙江衢州人, 硕士研究生, 研究方向为光伏微型逆变器 (E-mail: asense@163.com);

吴春华 (1978—), 男, 浙江嘉兴人, 副教授, 博士, 研究方向为电力电子变换与光伏发电技术 (E-mail: wuchunhua@shu.edu.cn)。

Research and analysis of photovoltaic micro-inverter topology

WANG Fei, XU Xinwei, WU Chunhua

(Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Micro-inverters, which are different from conventional central and string grid-tied inverters, are usually connected to a single photovoltaic panel. Micro-inverters have been undergoing rapid development in recent years as a result of panel-level MPPT (Maximum Power Point Tracking) control, flexible expansion and enhanced reliability. However, several challenges in terms of stability, energy conversion efficiency, power density, life span and cost are still noticeable. The design requirements and challenges of micro-inverter are illustrated, and the existing micro-inverter topologies are divided into four categories based on the energy conversion stages and bus types. In addition, the advantages and disadvantages of all types of topologies are clarified. Considering the circuit complexity, control difficulty, energy conversion efficiency, cost and life span under different topologies comprehensively, promising development tendency of micro-inverters is summarized.

Key words: photovoltaic; micro-inverter; topology; DC bus; pseudo DC bus; high frequency bus