

# 光伏并网逆变器拓扑结构与性能比较

余运江<sup>1</sup>, 李武华<sup>2</sup>, 邓 焰<sup>2</sup>, 臧 曙<sup>1</sup>

(1. 镇江船艇学院 工程系, 江苏 镇江 212003; 2. 浙江大学 电力电子技术研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 太阳能并网发电技术日益成为研究热点, 并网逆变器作为光伏阵列与电网的接口设备, 其拓扑结构决定着整个光伏并网发电系统的效率和成本, 是影响系统经济可靠运行的关键因素. 在简要介绍光伏并网逆变器常用拓扑方案基础上, 重点分析了其有代表性拓扑结构的特点、效率及适用场所, 并给出了并网逆变器拓扑结构未来可能的发展趋势.

**关键词:** 光伏; 并网逆变器; 拓扑结构

**中图分类号:** TM46      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1008-5475(2010)01-0013-06

## Compare and Analysis on Topologies of Inverters for a Grid-connected Photovoltaic Power System

YU Yun-jiang<sup>1</sup>, LI Wu-hua<sup>2</sup>, DENG Yan<sup>2</sup>, ZANG Shu<sup>1</sup>

(1. Department of Engineering, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003, China;  
2. Power Electronics Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Photovoltaic (PV) grid-connected power system is becoming a hot research area. As the interconnection of the PV arrays and the power grid, the topology structure of the grid-connected inverter is very important. Because it determines the system efficiency, cost and reliability. The art-of-the-state topologies for grid-connected power system was classified and introduced. Furthermore, the performance, the efficiency and the applications of the main grid-connected inverters were analyzed. At last, the future trend of the grid-connected inverters were given and summarized.

**Key words:** photovoltaic; grid-connected inverter; topology structure

光伏并网发电作为太阳能利用的主要形式之一, 倍受广大科研人员的关注<sup>[1]</sup>. 寻求高性能、低造价的光伏材料和器件减小光伏发电系统的自身损耗是其研究热点之一. 在光伏并网发电系统中, 逆变器作为光伏阵列与电网的接口设备, 其拓扑结构决定着整个系统的效率和成本, 是影响系统经济可靠运行的关键因素. 由于光伏并网逆变器的结构拓扑种类繁多、性能特点各异, 其原理分析和性能比较, 对于拓扑结构的合理选择、提高系统效率和降低生产成本有着极其重要的意义.

### 1 光伏并网逆变器常用拓扑方案

光伏并网逆变器的具体电路拓扑众多, 一般可按照有无变压器分类, 也可根据功率变换的级数来进

收稿日期: 2009-05-15; 修回日期: 2009-06-25

**作者简介:** 余运江(1972-), 男, 河南商丘人, 讲师, 硕士, 主要从事光伏并网发电技术研究; 李武华(1979-), 男, 湖南郴州人, 讲师, 博士, 主要从事新能源并网发电开发与应用技术研究; 邓 焰(1973-), 男, 四川宜宾人, 副教授, 博士, 主要从事电力电子技术、开关功率变换相关理论、技术研究; 臧 曙(1961-), 男, 湖南长沙人, 教授, 主要从事电气工程研究.

行分类.

### 1.1 按有无变压器分类

根据系统中有无变压器,光伏并网逆变器可分为无变压器型(Transformerless)、工频变压器型(Line-Frequency Transformer, LFT)和工频变压器型(High-Frequency Transformer, HFT)三种.图1是采用工频变压器型的拓扑结构,变压器置于工频电网侧,可有效阻止电流直流分量注入电网.高频变压器型中的变压器一般可放置在两个地方,如图2所示.图2(a)是把高频变压器置于DC-AC变换器内;图2(b)是把高频变压器置于DC-DC变换器内,两种方式均可实现隔离功能.

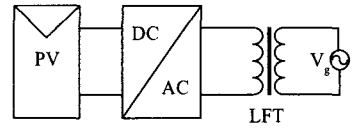


图1 工频变压器型拓扑结构图

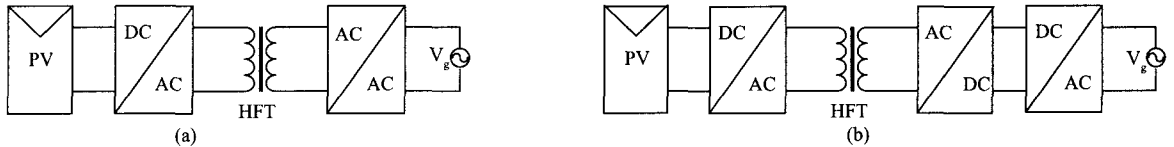


图2 高频变压器型的两种拓扑结构图

工频变压器(LFT)与高频变压器(HFT)相比,体积大、重量重、价格上也无优势,因此,在有变压器拓扑方案的选择中,一般倾向于采用HFT来实现升压和隔离的功能.为了尽可能地提高光伏并网系统的效率和降低成本,在直流母线电压足够高时,也可采用不隔离的无变压器型拓扑方案.

由于输入与输出之间无电气隔离,无变压器型拓扑产生的对地漏电流成为一个需要解决的技术难题<sup>[2-5]</sup>.光伏模块存在一个随外部环境变化而变化且范围很大的对地寄生电容,其容值在0.1~10 nF之间<sup>[6]</sup>,所以由许多光伏模块串并联构成的光伏阵列对地寄生电容变得更大,从而可能导致相当大的对地漏电流.较大的对地漏电流一方面会严重影响变流器的工作模式;另一方面也会给人身安全带来威胁.

### 1.2 按功率变换级数分类

按照功率变换的级数分类,并网逆变器一般可分为单级式(Single-Stage Inverter)和多级式(Multiple-Stage Inverter)两种拓扑方案,如图3所示.

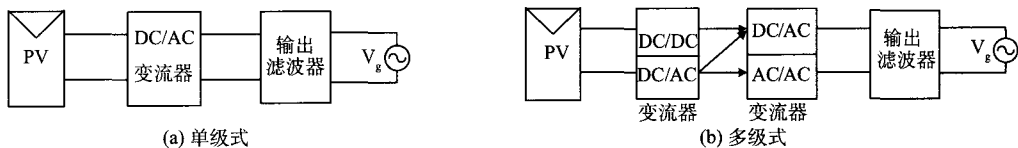


图3 按功率变换级数分类的逆变器拓扑方案

图3(a)所示为单级式逆变器的结构框图,它仅用一级能量变换就可以完成电压调整和并网逆变功能,具有电路简单、元器件少、可靠性高和高效低功耗等诸多优点,所以在满足系统性能要求的前提下,单级式拓扑结构将会是首选<sup>[7]</sup>.图3(b)给出了三种多级式变流器(Multiple-Stage Inverter)拓扑结构:DC-DC-AC、DC-AC-DC-AC和DC-AC-AC.它们需要多于一级的能量转换,其中前几级中通常具备升降压或电气隔离的功能,最后一级实现逆变并网的转换.DC-DC-AC为目前常用的一种拓扑结构,其前级为DC-DC变换器,用于实现电压调整和MPPT功能;后级为DC-AC逆变器,用于实现输出电流正弦化并网、孤岛效应检测和预防等功能.该拓扑结构简化了每一级的控制方法,使得每一级可以专注于各自控制方法的质量和效率.

## 2 单级式逆变器拓扑结构

单级式光伏并网逆变器的拓扑族如图4所示,根据逆变器输入电压和输出电压的比较,可以分为Buck逆变器、Boost逆变器和Buck-Boost逆变器三种类型.

图4(a)所示是一个Buck-Boost逆变器.该拓扑在电网电压的正半周功率开关管 $S_{p1}$ 高频工作, $S_{p2}$ 保持常通状态;在电网电压的负半周功率开关管 $S_{n1}$ 高频工作, $S_{n2}$ 保持常通状态.由于其同时工作的功率开关管数目较少,所以该拓扑结构具有开关损耗低、EMI弱、冷却需求不高等优点<sup>[8]</sup>.

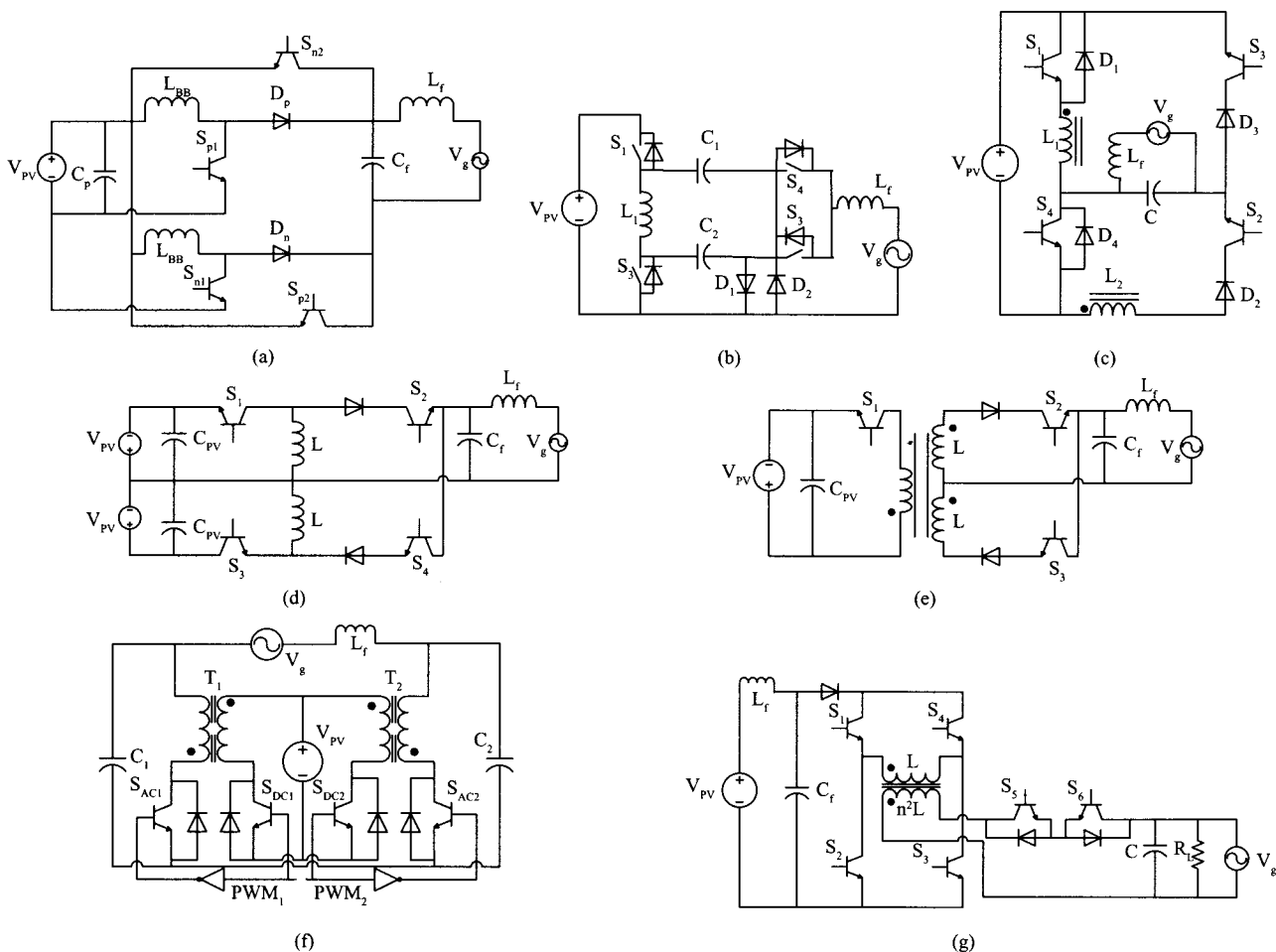


图4 单级式光伏并网逆变器的拓扑族

图4(b)由Zeta和Cuk拓扑结构派生而来<sup>[9]</sup>。在电网电压的正半周期,开关管 $S_2$ 、 $S_4$ 保持常通状态,开关管 $S_1$ 处于高频工作,变流器以Buck-Boost方式工作;在电网电压的负半周期,开关 $S_1$ 、 $S_3$ 保持常通状态,开关 $S_2$ 处于高频工作,变流器以Boost方式工作。由于在电网电压正、负半周期内变流器工作方式的不同,这就需要较为复杂的控制策略去抑止直流分量注入电网。该拓扑的优点是同时高频工作的开关器件少、损耗低。

图4(c)也是一个基于Buck-Boost的单级光伏并网逆变器拓扑,该拓扑结构在电网电压负半周期利用了耦合绕组的反激原理。因受其耦合绕组的限制,它仅适用于小容量的光伏并网系统,另外,它还存在着开关管损耗高、控制复杂的缺点<sup>[10]</sup>。

图4(d)为一个四开关非隔离型半桥Buck-Boost逆变器,其将输入端的光伏电源分成两部分,分别为两组Buck-Boost电路供电,两个Buck-Boost电路交替工作,每次工作半个电网电压周期。它消除了电网正、负半周期内工作不对称的缺点。另外,在每半个周期内高频工作的开关管只有两个,从而具有开关损耗低、EMI弱和可靠性高等优点。但是,该拓扑结构存在着光伏模块利用率低与由直流滤波电容造成的体积增大等不足<sup>[11]</sup>。

图4(e)是一个隔离型反激拓扑逆变器结构,在图4(d)所示逆变器基础上设计而成,它仅用三个功率开关管和一个隔离变压器,实现了逆变器的Buck-Boost变换<sup>[12]</sup>。该拓扑虽然利用变压器实现了PV阵列与电网的电气隔离,但系统损耗也为此有所增加。另外,因受反激变压器初级绕组电感量的限制,该拓扑仅适用于容量小于500 W的光伏并网发电系统。

图4(f)是一个四开关隔离型双向Buck-Boost逆变器,它由两个双向反激变换器并联组成。两个交流滤波电容取代了与PV阵列并联的电解电容来存储电能。当PV阵列产生的电能大于往电网输送的电能

时,两电容( $C_1$ 、 $C_2$ )吸收电能;当PV阵列产生的电能不能满足负载需求时,两个电容( $C_1$ 、 $C_2$ )释放电能.这种拓扑利用两个反激变压器实现系统的电气隔离,且可承受PV阵列有比较大的电压波动,但两个反激变压器也增加了生产成本<sup>[13]</sup>.

图4(g)是一个六开关隔离型Buck-Boost逆变器拓扑结构<sup>[14]</sup>.它由两组Buck-Boost斩波电路组成一个四开关桥,附加开关 $S_5$ 与 $S_6$ 保证每半个周期的同步切换.该拓扑结构中装设的高频变压器在起到电气隔离作用的同时,也确保在PV阵列输出电压变化范围较大时,逆变产生较好的输出波形.

综上所述,单级式Buck-Boost逆变器与传统工频逆变器相比,省去了工频变压器,拓扑结构简单,成本低.但由于其升压是通过电感储能实现,从而造成其升压的程度有限,仅适用于小功率的场合.在高性能、大功率、直流电压波动范围较大的场合,多级式逆变器较为适用.

### 3 多级式逆变器拓扑结构

#### 3.1 DC-DC-AC拓扑族

多级式DC-DC-AC逆变器的拓扑族如图5所示.

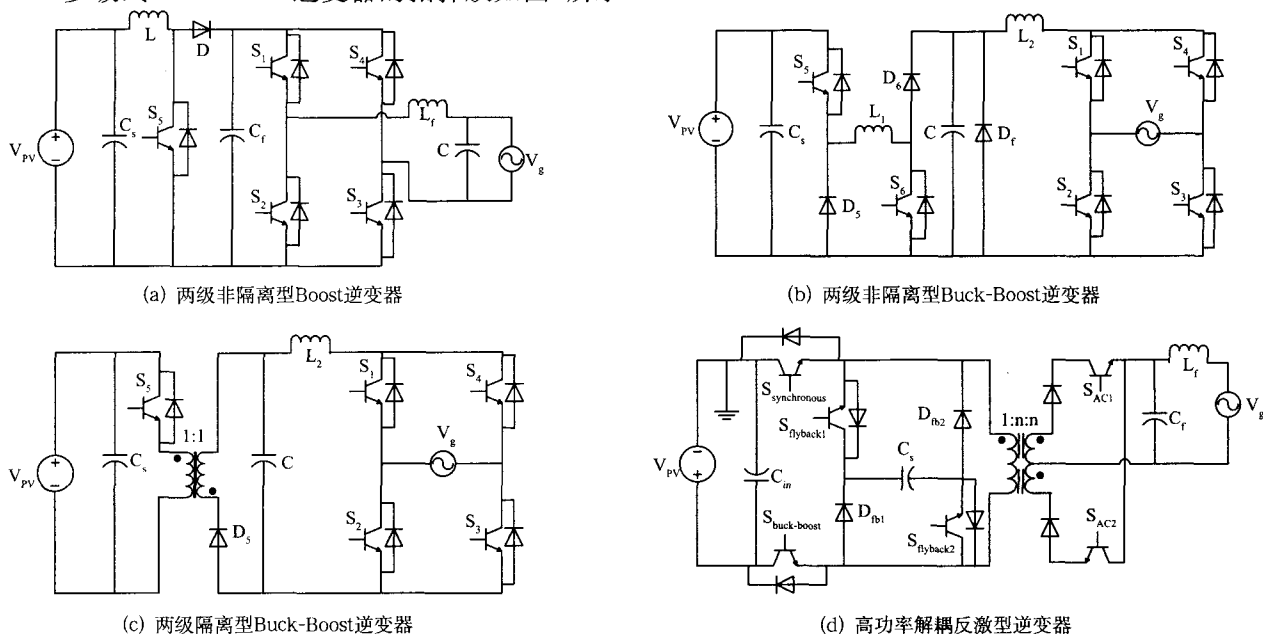


图5 DC-DC-AC拓扑族

图5(a)为一个两级式非隔离电压源型Boost逆变器,该拓扑结构由一个Boost型DC / DC变换器和一个电压型全桥逆变器构成.前级Boost变换器实现对PV阵列进行升压,保证直流电压的纹波在系统允许的范围之内,后级逆变器利用PWM技术产生交流电并与电网并联工作.该拓扑采用成熟电路,简单可靠;前后两级可以独立控制,控制环节易设计和实现;但电路输出没有电气隔离,在有隔离要求的场合不宜使用.

图5(b)为一个Buck-Boost型逆变器拓扑,考虑到安全原因,其对PV阵列输出的直流电压要求仅为100 V<sup>[15]</sup>.这种非隔离型拓扑虽然结构简单,但其直流电压变化允许范围小,电压转换率有限.在光伏阵列产生的直流输入电压非常低的情况下,带有高频变压器的隔离型拓扑能够提高其功率等级,如图5(c)就是它的一个应用实例,在电网与光伏发电系统之间采用反激变压器进行电气隔离.文献[16]和[17]提出了一种带隔离的高功率解耦反激型逆变器拓扑结构,如图5(d)所示,该拓扑首先在Buck-Boost电路中实现对PV阵列的MPPT(Maximum Power Point Tracking)控制,并将转化过来电能存储在中间电容( $C_s$ )上;然后,将 $C_s$ 存储的能量进行反激变换,并存储在反激变压器的励磁电感中;最后,将存储在励磁电感中的能量传送到变压器的副边,并在开关管 $S_{AC1}$ 和 $S_{AC2}$ 的控制下,经LC滤波后注入到电网.这样,中间电容被用作能量的缓存器,其两端的电压由两部分组成,一部分是直流电压,另一部分是两倍负载频率的

交流电压. 这种拓扑结构的特点是用小中间电容取代大电解电容, 延长了逆变器的使用寿命.

### 3.2 DC-AC-DC-AC拓扑结构

高升压比的多级式逆变器拓扑结构通常是由高频DC-AC-DC变流器和高频(或工频)逆变器两大部分组成. 高频DC-AC-DC变流器可将PV阵列输出的直流电压变换成可调的直流电压; 逆变器可将该直流电转换成预期的交流电压. 图6(a)为一种传统的DC-AC-DC-AC拓扑结构, 该拓扑通过前级逆变器、高频升压变压器、整流器和直流滤波器, 使其后级逆变器的输入得到了一个可控的直流电压. 由于该拓扑前后级的开关管工作频率都很高, 从而导致损耗较大、成本也很高.

图6(b)为一种电压源型Boost逆变器, 它的前级由PWM控制, 在前级与后级之间得到一串被称为伪直流环节的直流脉冲序列. 根据冲量原理, 这些直流脉冲序列所对应的是正弦或者半正弦波形. 与图6(a)相比, 图6(b)省去了直流滤波电路, 整流后直接通过后级逆变电路可得到高质量的交流输出, 并且其逆变电路的功率器件工作在工频, 从而降低了开关损耗. 最后交流输出需要利用低通滤波器来减小THD, 以提高交流输出的波形质量, 但其体积有所增大<sup>[18]</sup>.

图6(a)、(b)所示的两种拓扑结构的后级为电压源型逆变器, 而图6(c)的后级为一个电流源型逆变器, 其前级开关管高频斩波在电感上得到正半波, 后级使用很低的开关频率将电感电流调整为正弦输出, 输出端省去了交流滤波器, 中间省去了电解电容<sup>[19]</sup>. 该拓扑被美国通用电气公司在10 kW光伏并网发电系统中商业化推广.

以上对多级式逆变器拓扑结构的分析结果表明, 为了增强承受PV阵列输出电压波动的能力、扩大容量, 多级式逆变器一般包含两级或者更多级, 通常需要在前级装设一个高频变压器, 提高升压的比例, 实现必要的隔离; 后级是一个低开关频率的逆变器, 以减少整体的开关损耗. 与单级式逆变器相比, 它使用的开关器件数增多, 从而导致其开关损耗也略有加大.

## 4 并网逆变器的未来发展趋势

光伏并网逆变器是连接光伏阵列和电网的关键设备, 它主要承担着光伏阵列的MPPT控制与向电网注入单位功率因数的正弦交流电能两大任务. 针对其在光伏发电系统中的作用, 并网逆变器必须具备效率和安全可靠、寿命长且成本低的特点. 因此, 未来的光伏并网逆变器拓扑结构应有如下几个发展趋势:

- (1) 简化拓扑结构. 采用模块化设计、减少功率开关管数量、减少中间环节(如储能环节等)的使用、简化滤波装置等措施, 以实现节约成本、缩小体积、减轻重量、提高效率和功率密度.
- (2) 扩大允许输入的直流电压范围. PV阵列产生的直流电压波动大、幅值低, 这就要求逆变器在这种情况下能够输出高质量且适用于并网的交流电. 在直流侧电压波动大时, Buck-boost逆变器配合先进的控制方式, 可以实现最大限度地电能馈入电网, 并且不影响输出交流电的品质.
- (3) 输出较高的电能质量, 如较小的THD值、单位功率因数、与电网电压同步等.

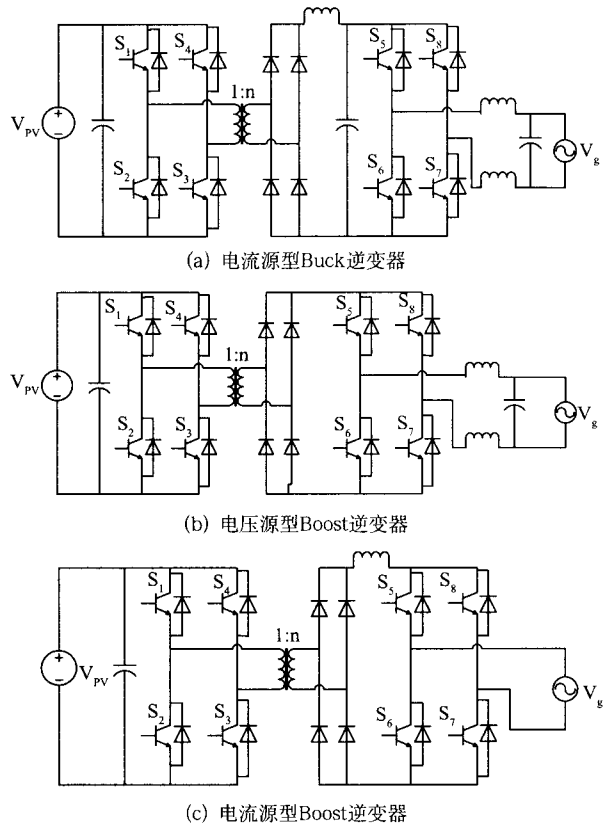


图6 DC-AC-DC-AC拓扑族

## 5 结束语

随着国家对可再生能源开发、利用重视程度的加大,光伏并网发电的发展前景良好.在此背景下,本文对太阳能变换系统中的光伏并网逆变器的拓扑结构和电路性能进行了梳理、分析和总结.并给出了并网逆变器拓扑结构的未来可能发展趋势,为未来并网逆变器选取提供了借鉴和参考.

### 参考文献:

- [1] 赵 为. 太阳能光伏并网发电系统的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2003.
- [2] GONZALEZ R, LOPEZ J, SANCHIS P, et al. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2007, 22(2):693-697.
- [3] LOPEZ O, TEODORESCU R, DOVAL-GANDOY J. Multilevel transformerless topologies for single-phase grid-connected converters:IECON 2006:IEEE Industrial Electronics, Paris, November 6-10,2006[C]. New York:IEEE Press,c2006.
- [4] LOPEZ O, TEODORESCU R, FREIJEDO F, et al. Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application: Power Engineering Society General Meeting, Tampa, June 24-28,2007[C]. New York:IEEE Press,c2007.
- [5] LOPEZ O, TEODORESCU R, FREIJEDO F, et al. Leakage current evaluation of a singlephase transformerless PV inverter connected to the grid:APEC 2007:Applied Power Electronics Conference, Anaheim, February 25 March 1,2007[C]. New York:IEEE Press,c2007.
- [6] CALAIS M, MYRZIK J, SPOONER T, et al. Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-An overview: PESC 2002:Power Electronics Specialists Conference, Cairns, June 23-27,2002[C]. New York:IEEE Press,c2002.
- [7] BOUTOT T, CHANG L. Development of a single-phase inverter for small wind turbines: IEEE 1998 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Waterloo, May 24-28,1998[C]. New York:IEEE Press,c1998.
- [8] JAIN S, AGARWAL V. A single-stage grid connected inverter topology for solar PV systems with maximum power point tracking[J]. IEEE Trans. power electronics, 2007, 22(5):1928-1940.
- [9] SCHEKULIN D. Grid-connected Photovoltaic System:Germany patent, DE197 32 218 C1[P], 1999.
- [10] XUE Yaosuo, CHANG Liuchen. Closed-loop SPWM control for grid-connected buck-boost inverters:PESC 2004:Power Electronics Specialists Conference, Aachen, June 20-25,2004[C]. New York:IEEE Press,c2004.
- [11] KASA N, IIDA T, IWAMOTO H. Maximum power point tracking with capacitor identifier for photovoltaic power system[J]. Electric Power Applications, 2000,147(6):497-502.
- [12] KASA N, IIDA T. Flyback type inverter for small scale photovoltaic power system:IECON 2002:2002 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Sevilla, November 5-8,2002[C]. New York:IEEE Press,c2002.
- [13] KJÆR S B, BLAABJERG F. A novel single-stage inverter for the ac-module with reduced low-frequency ripple penetration:EPE 2003:Europe Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, September 2-4, 2003[C]. Toulouse:Organizing Committee of EPE,c2003.
- [14] NAGAO M, HARADA K. Power flow of photovoltaic system using buck-boost PWM power inverter:IEEE PEDS 1997: Power Electronics and Drive Systems, Singapore, May 26-29,1997[C]. New York:IEEE Press,c1997.
- [15] SAHA S, SUNDARSINGH V P. Novel grid-connected photovoltaic inverter[J]. Generation, Transimission and Distribution, 1996,143(2):219-224.
- [16] SHIMIZU T, WADA K, NAKAMURA N. A fly back-type single phase utility interactive inverter with low-frequency ripple current reduction on the dc input for an ac photovoltaic module system:IEEE PESC 2002:Power Electronics Specialists Conference, Cairns, November,2002[C]. New York:IEEE Press,c2002.
- [17] KJÆR S B, BLAABJERG F. Design optimization of a single phase inverter for photovoltaic applications:PESC 2003:Power Electronics Specialist Conference, Acapulco, June 15-19,2003[C]. New York:IEEE Press,c2003.
- [18] XUE Yaosuo, CHANG Liuchen, KJÆR S B, et al. Topologies of single-phase inverter for small distributed power generators: an overview[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2004, 19(5):1305-1313.
- [19] BOSE B K, SZCZESNY P M, STEIGERWALD R L. Microcomputer control of a residential photovoltaic power conditioning system[J]. IEEE Trans Industry Applications, 1985, IA-21:1182-1191.

(责任编辑:孙 洪)