

文章编号:1005-0523(2014)01-0077-05

单相单级升降压逆变器的拓扑分析与比较

章勇高,康淦明,李 洋,王 妍,常凯旋

(华东交通大学电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:传统能源的快速消耗使新能源得以快速发展,其中以光伏发电尤为引人注目。作为光伏发电系统能量转换与控制核心的光伏逆变器,是将光伏阵列输出的直流电转换成交流电并注入到电网的电力装置。其拓扑结构的性能不仅决定着整个系统的发电效率,而且大大影响总体系统成本。作为快速发展的分布式光伏发电系统,单相单级升降压逆变器具有成本低、效率高、结构简单的优点,成为主要的光伏逆变器。论文以5种典型的隔离型和非隔离型的单相单级升降压逆变器为研究对象,从拓扑结构、是否并网运行以及主要性能指标等方面进行了比较分析,说明了逆变器设计应综合考虑开关器件个数、高频工作器件数、工作对称性、EMI(电磁干扰)以及系统效率等因素,指出未来单相单级升降压逆变器的低EMI干扰、低成本、高效率以及高可靠性的发展趋势。

关键词:升降压逆变器;拓扑结构;低成本;高可靠性

中图分类号:TM615

文献标志码:A

随着社会的不断进步和发展,传统能源越来越不能满足人类生活对能源的需求,人们不断寻求更多的新型能源来补充或代替传统能源,近年来,作为清洁能源的光伏发电越来越受到人们的关注。光伏发电系统就是将变化的光伏阵列直流输出电压转换成符合电网电压和频率的交流输出,并向电网注入电流。

光伏发电系统主要具有集中式和分布式两种结构形式,其中分布式光伏发电系统^[1-4]的效率更高,一次性投入更低,寿命更长且组装简单,具有一定的发展优势。尤其是2012年10月26日国家电网公司向社会发布《关于做好分布式光伏发电并网服务工作的意见》,国家电网做出接纳分布式光伏发电并网的承诺^[5],意在促进国内光伏产业走出困局,保持健康持续发展,各地纷纷允许中小型分布式光伏发电并接电网^[6],使得分布式光伏发电^[7-8]具有更大的发展空间。光伏发电系统主要由光伏阵列和光伏逆变器组成,其中逆变器的拓扑结构决定着整个系统的运行效率和成本,因此,分布式光伏发电系统的发展必将促进中小功率单相光伏逆变器的快速发展。

根据变换级数逆变器可分为单级和多级变换器,其中多级变换器采用两级或多级功率单元实现能量变换,其技术比较成熟,但结构复杂,效率较低,成本和体积均较大,适合于集中式光伏发电系统。而单相单级逆变器仅采用一级功率单元实现分布式电源的变换,具有电路简单、元器件少、输入电压范围宽^[9-10]、可靠性高、效率高、功耗低的优点,更加适合于分布式发电系统的小型化低成本应用^[11-12]。分布式逆变器输入的分布式直流电压常常变化较大,故常采用升降压型结构,因此单相单级升降压逆变器将成为分布式逆变器的研究热点。

收稿日期:2013-09-16

基金项目:江西省工业科技支撑项目(20122BBE500046)

作者简介:章勇高(1975—),男,副教授,博士,主要从事光伏逆变器,非并网风力发电及应用。

围绕单相单级升降压隔离型和非隔离型两类逆变器,分析比较几种典型逆变器拓扑结构的性能指标,研究影响逆变器EMI干扰,效率及成本的因素,指出升降压逆变器的未来发展趋势,为分布式逆变器的设计提供重要的指导原则。

1 单级升降压逆变器的拓扑结构分析

单相单级分布式升降压逆变器常采用工频或高频变压器实现电网和光伏系统的隔离,此为隔离型逆变器,它是光伏逆变器的主要形式,但具有体积重、效率低等缺点。为降低系统成本,简化拓扑结构,近年来提出了很多非隔离型逆变器拓扑结构^[13-14],逐渐成为研究热点之一。

1.1 非隔离型单相单级升降压逆变器

图1(a)所示逆变器拓扑是由Kasa提出的一种Buck-Boost(升降压)电路的单级非隔离型逆变器^[15]。该逆变器由4个开关管、2个升压电感构成的两组Buck-Boost电路组成。两个Buck-Boost电路交替工作。正负半周期各有两个工作阶段,一个电感充电,一个电感放电。负半周期工作情况类似,极性相反。从而使得逆变器在电网正负半周期内工作对称。由于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弱等优点。对于输入电压范围,这里对最低输入电压有所要求。由于功率一般做不大,所以只能应用在小容量的光伏并网系统中。比较适合用于住宅光伏发电系统。但是,该拓扑结构存在着光伏模块利用率低,以及由直流滤波电容造成的体积增大成本偏高等缺点。

为了提高效率,降低电磁干扰。图1(b)提出了一种谐振式开关升降压逆变器^[16]。如图1(b)所示。该逆变器也由4个开关管、2个二极管构成。 S_3, S_4 零电流导通。且正负半周期只有一个开关管高频工作。故开关损耗和EMI大大降低,效率可达到90%以上。但是该逆变器的最大缺点在于谐振控制过程较为复杂。

图1(c)所示为一种电流源型升降压逆变器^[17],该逆变器4个功率开关 S_1, S_2, S_3, S_4 和2个功率电感 L_1, L_2 构成,在电网的正半周期仅有一个开关管高频工作,另一个开关管为常通状态,因此,控制起来比较容易,可直接采用SPWM方式^[18]。且电网正负半周期工作状态对称。从而消除了直流并网电流,另外,该逆变器还具有开关损耗低,EMI干扰小的优点。由于该拓扑有专门电感和开关来处理功率,故适用的功率等级较大。

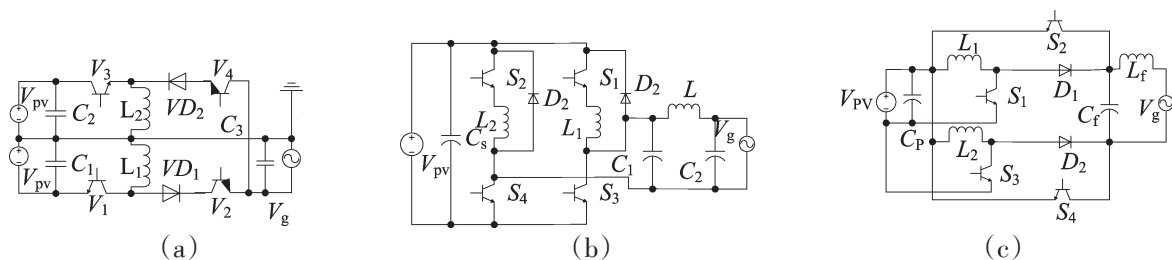


图1 非隔离型单相单级升降压逆变器

Fig.1 Non-isolated single-phase single-stage buck-boost inverter

1.2 隔离型单相单级升降压逆变器

图2所示为两种由3个开关管以及一个反激变换器组成的新型隔离型逆变器^[19-20],具有开关数目少,结构简单,开关损耗以及EMI低的优点^[21]。该逆变器正负半周期的工作过程对称,不产生直流偏置电流。在每半个周期,均分成两个工作过程。一是原边线圈的充电过程,二是副边线圈的放电过程,工作过程中,直流侧与交流侧被隔离变压器隔开。没有对地漏电流产生。但是隔离变压器的存在使得逆变器的体积增大、成本提高。

图2(a)中的反激变换器^[22-23]具有2个副边绕组,正负半周的工作过程完全对称,而三绕组的变压器增大了系统成本,降低系统效率,使得效率低于90%,且由于初级绕组的电感量的限制使得逆变器适用于低于500 W的分布式光伏模块。

图2(b)为图2(a)的改进型结构^[24],隔离变压器仅有一个副边绕组,故正负半周工作不对称,而将三绕组改进为二绕组。降低了系统成本和体积,降低损耗还提高了系统效率,高于90%,功率可以达到1 kW。

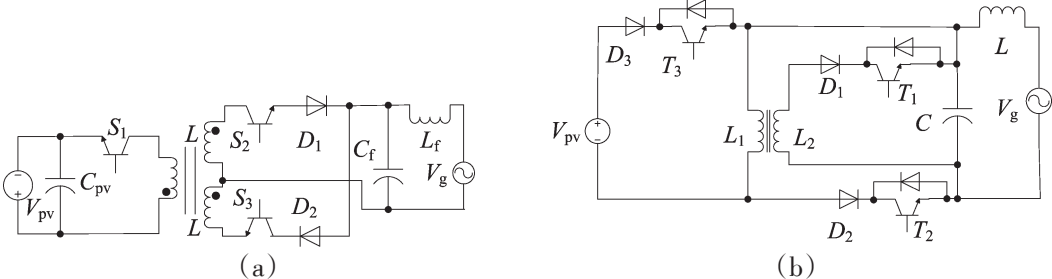


图2 隔离型单相单级升降压逆变器

Fig.2 Isolated single-phase single-stage buck-boost inverter

2 性能对比分析

表1列出了图1(a),(b),(c)及图2(a),(b)5种单相单级升降压逆变器的性能比较表,表中从二极管数、开关数、最低输入电压、工作对称性、EMI、功率等级和工作效率等方面进行了比较。

1) 从表中可以看出,三开关逆变器的总体效率大于四开关逆变器^[25]。说明了开关数及其他元器件数对逆变器的效率、成本、体积影响较大,进而影响系统、功率密度。

2) 储能电感功率将限制逆变器的功率等级,因此,减少储能电感,优化电感设计奖大大提高系统功率。

3) 图1(a)中,每半周期有2个开关器件处在高频状态,而图1(b),(c)仅有1个开关器件在高频工作,故图1(c)中的逆变器EMI和效率性能指标相对图1(a),(b)更优。

4) 图1(c)中逆变器开关器件工作在谐振状态下,减小了EMI干扰,减少了开关损耗。

5) 图2中逆变器的功率等级低于1 kW,而图1中逆变器的功率等级可以达到几个kW,原因在于图2中隔离变压器的原边线圈以及存在的功率损耗限制了功率大小。故逆变器适用于小功率等级的光伏应用场合。

6) 尽管非隔离型逆变器具有结构简单、质量轻、成本低,但是由于光伏阵列具有较好的输出等级电压,导致整个系统需具备较高的绝缘等级,否则容易出现漏电现象^[26],因而有一些国家禁止隔离型逆变器并网运行。

表1 5种升降压逆变器的性能比较

Tab.1 Comparison of five different buck-boost inverters

拓扑类型	二极管数/个	开关数/个	最低输入电压 (US/EU)/V	对称性	EMI	功率等级/W	系统效率/%
图1(a)	2	4	42/81	对称	中等	300~500	80
图1(b)	2	4	42/81	对称	低	500~3 000	90
图1(c)	2	4	范围较大	对称	较低	3 000	较高
图2(a)	2	3	范围较大	对称	低	<500	<90
图2(b)	6	3	50	不对称	低	<1 000	90

3 讨论

对于光伏逆变器的设计和开发,主要根据其是否并网运行、元器件数目、系统效率、EMI干扰、功率等级以及输出直流分量的抑制等方面进行评估。这些性能指标相互影响、相互制约。故选择方案时应该综合考虑。从而得到最优化设计。

光伏逆变器有并网和离网运行两种模式,他们对于功率流的方向,负载特性和系统接地具有不同的要求。对于并网运行,功率仅从电源流向负载。而离网运行时,则功率流方向为双向的,此时需要考虑反向电流的流通。通常采用反馈二极管及受控双向逆变器,以使电流从负载流向直流侧。图1(a)和图2(a),(b)中逆变器无反馈能量通道。故只能并网运行。而图1(b),(c)采用了全桥逆变和反馈二极管结构。故可运行在并网和离网两种工作模式下。

关于输出直流分量的抑制。从理论上讲,并网逆变器将交流电流注入到电网里。然而,由于逆变器工作不对称,使得并网电流中含有直流分量。从而对电网设备产生不良影响,如引发互感器饱和、变电所接地网腐蚀等问题。通常在实际应用中,需通过适时的检测并网电流的直流分量。采用闭环控制算法,以补偿逆变器的输出脉宽,从而抵消并网电流中的直流分量。

在逆变器中产生EMI干扰的主要原因在于开关管的高频工作、以及感性元件工作过程中的电磁辐射。而且随着开关频率的越来越大,EMI干扰也越大。因而隔离型逆变器的高频变压器将增大系统的EMI干扰,高频变压器改进的优劣对于逆变器的性能影响较大。另外,为降低EMI干扰,尽量降低开关管的数目也是努力的方向,如图1(b),(c),图2(a),(b)均只有一个开关器件工作在高频工作状态下,从而大大降低了系统EMI。最后,软开关技术也是降低EMI干扰的重要技术,如图1(c)所示。

系统成本和效率一直是光伏逆变器的关注焦点。影响成本和效率的因素有拓扑结构的简易程度,如开关器件以及储能器件数,变压器体积和重量。中间转换环节、以及是否软开关动作。图2中逆变器具有3个开关管,结构较简单,而图1中逆变器具有4个开关器件。工作情况较为复杂。表1也反映了图2所示逆变器的效率要高于图1所示逆变器的效率。

由于光照角度、辐照度以及阴影的变化,光伏阵列的输出电压波形波动很大,要求光伏逆变器能适应宽输入电压范围,从而从光伏阵列中提取最大能量。图1(a),(b)直流侧电压不得低于42 V。图2(b)的直流侧输入电压不得低于50V;而图2(a)的直流侧输入电压很低,它们对直流输入电压的鲁棒性好;具有高可靠性的优点。

4 结论

光伏逆变器是光伏发电系统中的一个重要组成部分,它决定着整个系统的性能,成本、效率以及使用寿命。针对隔离型和非隔离型逆变器^[24],围绕开关器件数目、是否并网运行、直流分量抑制、EMI干扰、工作对称性、功率等级以及成本和效率方面进行对比分析。提出了光伏逆变器中的发展趋势以及设计考虑:

- 1) 减少功率开关和储能元件个数,简化拓扑结构,降低系统成本并提高系统效率。
- 2) 优化磁性元件设计,尽量采用带有高频变压器的隔离型逆变器结构,不仅降低了系统体积和重量,而且有利于效率的提高。
- 3) 减少高频工作的开关数,从而降低EMI干扰,提高系统效率。
- 4) 控制光伏逆变器工作在对称状态,从而减少直流分量注入电网中,或采用对消法来补偿产生的直流分量,从而降低或消除直流分量。
- 5) 拓宽直流输入电压范围,提高系统对直流输入的鲁棒性。保证在较低直流输入电压状态下仍能向电网注入电流,提高系统的工作可靠性。

最后,光伏逆变器的使用寿命也是光伏应用中必须考虑的,一般情况下,光伏阵列以及半导体的工作寿命较长,可以达到10年左右,而作为储能元件的电解电容器工作年限却很低,低于3~5年,故电解电容器成为限制逆变器使用寿命的瓶颈,因此,研究无电解电容光伏逆变器将成为未来发展的重要趋势。

参考文献:

- [1] 曾正,杨欢,赵荣祥. 多功能并网逆变器的研究综述[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):5-15.
- [2] 毛行奎,毛洪生,裴昌盛,张锦吉. 单相非隔离型并网光伏逆变器研制[J]. 电工电能新技术,2012(2):88-92.
- [3] KJAER S B, PEDERSEN J K, BLAABJERG F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules [J]. IEEE Transactions On Industry Application, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [4] Xue Yaosuo, KJAER S B, CHANG Liuchen. Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: an overview[J]. IEEE Transactions On Power Electronics, 2004, 19(5): 1305-1314.
- [5] 王思童. 国网发布《关于做好分布式电源并网服务工作的意见》分布式电源发展迎“春天”?[J]. 电器工业, 2013(5): 44.
- [6] 本刊编辑部. 助力分布式电源并网开辟绿色能源通道——北京市首个个人分布式光伏发电项目顺利并网[J]. 农电管理, 2013(4): 22-23.
- [7] 刘杨华,吴政球,涂有庆,黄庆云,罗华伟. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
- [8] 余昆,曹一家,倪以信,陈星莺,郭创新. 分布式发电技术及其并网运行研究综述[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2009, 37(6): 741-748.
- [9] KOUTROULIS E, BLAABJERG F. Design optimization of gridconnected PV inverters [C]//2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Fort Worth, USA: TX, 2011: 91-698.
- [10] ALMAZA J, ALVAREZ J, AGUILAR C. Analysis and experimental study of the buck, boost and buck-boost inverters[C]// IEEE PESC 99, SC: Charleston, 1999: 801-806.
- [11] 崔金兰,刘天琪. 分布式发电技术及其并网问题研究综述[J]. 现代电力, 2007, 24(3): 53-57.
- [12] 余运江,李武华. 光伏逆变器拓扑结构分析与性能比较[J]. 苏州市职业大学学报, 2010, 21(1): 13-18.
- [13] 王国峰,王国庆,张洪涛,李佳桐. 一种新型单相非隔离型光伏并网逆变器研究[J]. 电力电子技术, 2013(3): 45-47.
- [14] 黄丽娟,谢勇,杨传超,方宇. 新型非隔离光伏并网逆变器的研究[J]. 中国新技术新产品, 2013(16): 21-22.
- [15] KASA N, OGAWA H. a transformer-less inverter using buck-boost type chopper circuit for photovoltaic power system[C]// PEDS 99, HongKong, 1999: 653-658.
- [16] WANG Chienming. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter [C]//Proc IEEE APEC 03, Miami Beach: FL, 2003: 51-57.
- [17] JAIN S, AGARWAL V. A single -stage grid connected inverter topology for solar PV systems with maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions On Power Electronics, 2007, 22(5): 1928-1940.
- [18] 陈诚,王勋,陈宏波. 基于改进双闭环控制的光伏并网系统研究[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(5): 50-56.
- [19] KASA N, LIDA T, IWAMOTO H. An inverter using buck-boost type chopper circuits for popular small-scale photovoltaic power system[C]//IEEE IECON99, CA: San Jose, 1999: 185-190.
- [20] 王强,胡伟芳,白亚亚. 新型高频隔离型并网逆变器[J]. 低压电器, 2012(4): 31-34.
- [21] 安少亮,孙向东,任碧莹,钟彦儒. 隔离型三相并网逆变器的开关损耗优化控制[J]. 电力电子技术, 2012(11): 1-3.
- [22] 周林,武剑. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1145-1154.
- [23] SHIMIZU T, WADA K, NAKAMURA N. A flyback-type single phase utility interactive inverter with low-frequency ripple current reduction on the dc input for an ac photovoltaic module system[C]//IEEE PESC'02, Australia: Cairns, 2002: 1483-1488.
- [24] ZHANG Yonggao, WOLDEDIORGIS A T, CHANG Liuchen. Design and Test of a Novel Buck-Boost Inverter with Three Switching Devices[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), Twenty Seventh Annual IEEE, FL: Orlando, 2012: 1973-1978.
- [25] KJAER S B, PEDERSEN J K, BLAABJERG F. Power inverter topologies for photovoltaic modules—A review[C]//IEEE IAS, 2002: 782-788.
- [26] 邬伟扬,郭小强. 无变压器非隔离型光伏并网逆变器漏电流抑制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012(18): 1-8.

Topological Analysis and Comparison on Single-phase Single-stage Buck-boost Inverter

Zhang Yonggao, Kang Ganming, Li Yang, Wang Yan, Chang Kaixuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Rapid consumption of traditional energy enables rapid development of new energy, and photovoltaic power generation is particularly striking. Photovoltaic (PV) inverter, as the converting and controlling core in photovoltaic generation system, is an important power device for converting DC of photovoltaic array into AC current and then injecting into power line. The topological structure of PV inverter not only decides the efficiency of the whole generation system, but also greatly affects the overall system costs. With the rapid development of distributed photovoltaic generation system, single-phase single-stage buck-boost inverter has the advantages of low cost, high efficiency, simple structure, and becomes the main PV inverter. This paper studies the typical five different non-isolated and isolated single-phase single-stage buck-boost inverters and compares their topology structure. It is concluded that the design of PV inverter should consider power device number, high frequency device number, the symmetry of system operation, EMI interference and system efficiency, and the future development of single-phase single-stage buck-boost inverter may aim at lower EMI interference, lower cost, higher efficiency and higher reliability.

Key words: buck-boost inverter; topological structure; lower cost; high reliability