

高频并网光伏逆变器的主电路拓扑技术

舒 杰^{1,2}, 傅 诚¹, 陈德明², 沈玉樑¹

(1.中山大学, 广东 广州 510275; 2.中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 近年来, 用于可再生能源发电的高频并网逆变技术在电力电子与控制技术领域已成为研究热点。在此总结了目前常用的单相高频并网光伏逆变器的各种主电路拓扑结构, 并按电路拓扑进行分类, 对每一种拓扑进行了分析研究。通过对其工作原理的描述, 比较了各种电路拓扑的性能特点及在应用中存在的优缺点, 指出了高频并网逆变器的应用发展方向和与国外技术存在的差距。

关键词: 逆变器; 高频 / 光伏; 并网; 主电路拓扑

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2008)07-0079-04

A Review of Main Circuit Topology for High-frequency Grid-connected PV Inverters

SHU Jie^{1,2}, FU Cheng¹, CHEN De-ming², SHEN Yu-liang¹

(1.Yat-SEN University, Guangzhou 510275, China;

2.Chinese Academy of Science, Guangzhou Institute of Energy Conversion Guangzhou 510640, China)

Abstract: High-frequency grid-connected inverting technologies for generating electricity using renewable energy are becoming an research hotpot in power electronic and controlling area. In this paper all kinds of main circuit topologies of popular single-phase high-frequency grid-connected PV inverters currently have been summarized and the main circuit topologies based on the differ class of circuit topologies have been researched. Through the expression of these circuit principle, the operating performances and electric characteristics have been analyzed, including the advantage and disadvantage in application. The difference of the technologies between domestic and oversea are pointed out.

Keywords: inverter; high-frequency / photovoltaic; grid-connected; main circuit topologies

1 引言

近年来, 应用于可再生能源的高频并网逆变技术在电力电子技术领域形成研究热点。高频并网逆变器在太阳能光伏、风力发电等可再生能源分布式能源系统中具有广阔发展前景。太阳能、风能发电的重要应用模式是并网发电, 并网逆变技术是太阳能光伏并网发电的关键技术。在光伏并网发电系统中所用到的逆变器主要基于以下技术特点: 具有宽的直流输入范围; 具有最大功率跟踪 (MPPT) 功能; 并网逆变器输出电流的相位、频率与电网同步, 波形畸变小, 满足电网质量要求; 具有孤岛检测保护功能; 逆变效率高达 92% 以上, 可并网运行^[1-3]。逆变器的主电路拓扑直接决定其整体性能。因此, 开发出简洁、高效、高性价比的电路拓扑至关重要。总结分析了单相高频并网光伏逆变器的各种拓扑结构及应用特点, 指出了高频并网逆变器技术的应用发展方向以及与国外技术的差距。

2 高频并网光伏逆变器的主电路拓扑分析

高频并网光伏逆变器的拓扑类型可按变换技术与应用形式分类。这里针对分布式能源系统中广泛

使用的单相并网逆变, 并按有无隔离变压器进行分类分析研究。

2.1 无变压器高频并网逆变器

这种拓扑原理图如图 1 所示。高频无隔离系统的优点是省去笨重的工频变压器, 具有更高效率, 且功率密度高, 体积小, 重量轻, 使用方便等。该系统的缺点是串并联的太阳电池组件直流输出端与电网没有电气隔离, 太阳电池组件两极有电网电压; 由于使用了高频 DC/DC, 增加了 EMC/EMI 的解决难度, 加大了开关损耗, 可靠性也较低, 这是高频逆变要克服的技术难点。另一种新颖的 Boost 双模式光伏并网逆变器如图 2 所示^[4]。

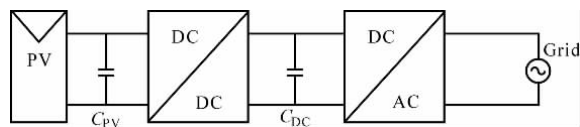


图 1 无变压器高频并网逆变器原理框图

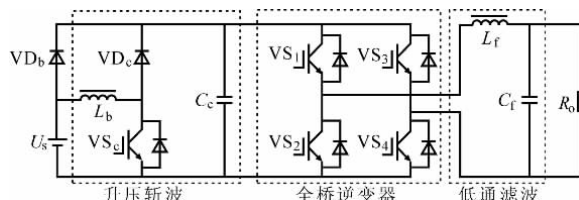


图 2 双模式 Boost 光伏并网逆变器

与一般电路不同, 图 2 电路增加了旁路二极管 VD_0 , 它有两种工作模式: 光伏阵列电压较低时,

定稿日期: 2008-06-03

作者简介: 舒 杰 (1970-), 男, 副研究员, 博士研究生, 研究方向为光伏发电的理论与应用。

Boost 电路升压加逆变运行, 系统为两级能量变换; 光伏阵列电压高于设定值时, 系统变为单级逆变系统, 有助于系统效率的提高。这种拓扑加大了光伏阵列设计安装的自由度。

目前一般采用的是多支路 DC/DC 并联光伏并网逆变器^[6]。图 3 示出其结构图。对于每一路光伏阵列输入支路, 系统检测出光伏方阵的输出电压和电流, 根据电压电流的信息, 判断出最大功率点的位置, 再通过控制手段调节 DC/DC 变换电路的占空比, 以达到期望的工作点。每路最大功率跟踪的输出并联到直流母线上, 最大功率跟踪器和后级逆变系统的中间有较大的电解储能电容, 以实现能量解耦。

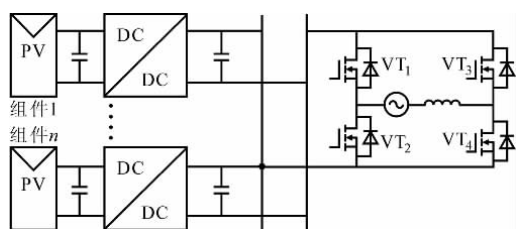


图 3 多支路高频并网逆变器主电路拓扑

还有一种新颖的电流源型多级电流 Boost 光伏并网逆变器^[6]。这种逆变器的优点是功率器件的电流平衡, 降低了功率器件电流的上升率, 从而减小了系统的 EMI 干扰, 系统有极强的鲁棒性和适应性; 由于电流波动很小, 电流响应速度快, 最大功率跟踪的精度高。缺点是, 由于为电流源型逆变器, 因而平波电感值较大, 以致在大功率的情况下电感的损耗也增大, 降低了系统的整体效率。另外, 电网侧与光伏组件无电气隔离。

图 4 示出主电路拓扑, 在单级光伏并网基础上提出了一种三桥臂整流逆变单相并网光伏逆变器^[7], 该电路由整流臂、通用臂、逆变桥臂 3 个半桥组成。这种电路效率较高, 而且最重要的是它的输出电压可调, 可外加其它负载, 如, 可作为带蓄电池负载的可调度式并网应用。

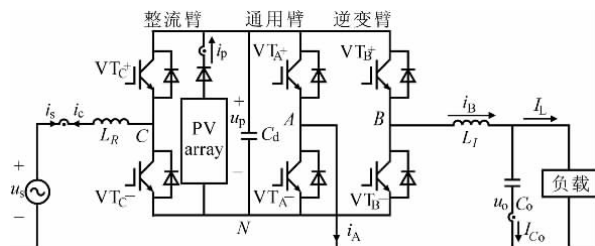


图 4 三桥臂单相并网光伏逆变器电路拓扑

除了 Boost 电路用得较多之外, 有人提出了一种基于 Buck-Boost 的非隔离型并网光伏逆变器^[8]。该系统具有二套 PV 系统和 Buck-Boost 斩波电路, 在这套系统中解决了并网系统中电网和光伏阵列之间对大地的漏电流, 但是光伏阵列的利用率只有常规的系统的一半, 这是该系统的缺点所在。实际应用

中, 这种电路拓扑很少采用。

这类无变压器型并网逆变器, 逆变器的抗干扰能力相对弱一些, 如果电网波动大或者雷雨天气容易将浪涌冲击引入逆变器, 导致其损坏, 因此必须做好防雷接地措施。其功率一般在 50 kW 以下。

2.2 带变压器隔离的高频并网光伏逆变器

就工频单级逆变系统而言, 高频隔离逆变系统省去了笨重的工频变压器, 取而代之的是高频变压器。光伏阵列和电网之间也有着良好的电气隔离, 其控制原理框图如图 5 所示。可见, 系统的能量变换为三级变换, 即 DC-HFAC-DC-LFAC。一般来说, 高频隔离系统同时具有电气隔离和重量轻的优点, 系统效率在 93% 以上。但也有其缺点, 如由于隔离 DC/AC/DC 的功率等级一般较小, 所以这种拓扑结构集中在 2 kW 以下; 由于高频 DC/AC/DC 的工作频率较高, 一般为几十千赫兹, 或更高, 系统的 EMC 比较难设计, 系统的抗冲击性能较差。

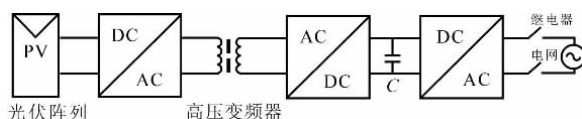


图 5 高频隔离型光伏并网系统控制框图

Mastervolt 公司推出的最大功率 145 Wp 的 Soladin120 光伏并网逆变器^[9]。系统具有即插即用的功能, 号称是最小和最智能化的微型并网光伏逆变器, 适合的光伏阵列功率范围为 70~145 Wp, 可直接安装在光伏组件背面。该电路的前级拓扑为推挽电路, 这种电路尤其是适合低电压的场合, 这为选择电压等级较低的功率 MOSFET 提供了便利, 降低了系统的成本, 但效率不太高。

另一种高频环节光伏并网逆变器, 其光伏阵列电压先由高频逆变转换为高频电压, 经高频变压器隔离、传输、电压比调整, 再经过高频 AC/低频 AC 变换, 输出的低频交流电送到交流电网中^[10]。该逆变器电路结构由高频逆变器、高频变压器、整流器、极性反转逆变桥、以及输入、输出滤波器构成。其特点是具有高频电气隔离, 直流变换级工作在正弦脉宽调制、极性反转逆变桥电压应力低且为 ZVZCS, 可实现光伏阵列的最大功率点跟踪和单位功率因数等优点, 但存在电路结构偏复杂, 功率变换级数偏多, 从而引起相应系统整机效率偏低、成本偏高等缺点。

为了提高系统的效率, 将串联谐振技术应用到光伏并网逆变器中^[11]。系统的 DC/DC 变换器谐振电容 C_R 通过变压器初级的等效电感形成串联谐振环。使得 VS_{PV1} 和 VS_{PV2} 工作在 ZCS 模式, 降低了功率器件的损耗。

在较大功率场合, 尤其是在美国和日本的光伏建筑并网发电中, 逆变器必须要求带变压器隔离。高

频隔离式变压器并网系统也可以采用分布式多支路并网发电模式^[12]。

上述高频并网系统为三级功率变换,系统功率器件偏多,整体效率偏低,成本较高。实际上在中小功率等级的高频带隔离型变压器的光伏并网系统中,二级功率变换居多,也就是 DC-DC-LFAC,当然 DC/DC 变换器也可以用不同的拓扑实现。

2.3 高频链并网光伏逆变器

近年来,基于高频链逆变器技术的光伏并网逆变器也是研究方向之一^[13]。前级 DC/AC 部分将直流逆变成为高频交流,后级 AC/AC 部分称为周波变换器,其主要目的是将高频交流转换为低频交流。这种拓扑由于采用传统的 PWM 技术,致使周波变换器在换流时因漏感能量引起电压过冲。通常的解决办法是采用缓冲电路或有源箝位电路,以吸收存储在漏感中的能量,但如此又使得变换效率不够理想或增添了电路的复杂性,甚至使系统的总体可靠性降低。

该拓扑族实际上包括推挽全波式、推挽桥式、半桥全波式、半桥桥式、全桥桥式、全桥全波式等 18 种电路^[14-15]。该系统需要控制的功率器件较多,系统控制较为复杂,另外系统还要完成 MPPT 与并网电流相位同相的问题,系统总体控制技术与纯粹的高频链逆变器技术相比难度大得多,由此造成系统效率低、可靠性难以得到保证。所以多种原因造成了该拓扑族在光伏并网系统中所占市场份额小,应用面远不如普通高频链逆变器。作为无源逆变器,高频链逆变器在容性负载和感性负载的情况下,其输出电压的波形远优于普通的逆变器,且能量可以双向流动。但是在光伏并网作为有源逆变且控制更加复杂的情况下,这种拓扑的应用受到一定的限制。相信随着功率器件封装技术的改进以及专用的正弦脉宽调制 (SPWPM) 控制芯片的开发,高频链光伏并网逆变器也会得到较大的发展。

实际上,在小功率场合高频链逆变器更多采用结构较为简洁的拓扑。该系统由带中心抽头的高频变压器和后级由二极管和功率 MOSFET 构成的周波变换器组成。前级反激变换器通常不采用 PWM,而是采用 SPWPM,后级周波变换器将高频交流整流成为低频交流。在实际的应用中,应当注意功率 MOSFET 的极性接法,同时,其驱动电路的设计应当更加合理,以减小开关损耗,可考虑采用同步整流技术中专用驱动芯片来驱动 MOSFET 功率管。

3 结论

通过以上电路拓扑的分析总结,可以看到,具有广阔发展前景的光伏发电技术要实现普及应用,离不开电力电子与控制技术的支撑与发展。结论如下:

(1) 并网逆变器主电路拓扑结构总是伴随电力电

子技术、控制技术、半导体功率开关器件工艺技术、高性能专用微处理器等的发展而发展,必须广泛地集成各种新技术,应用到系统拓扑设计中,才能取得满意的效果。例如,为提高并网逆变器效率,关键在于降低主动与被动功率器件的损失,高频逆变采用快速开关器件与降低开关损耗是设计的前提,采用软开关技术、模块化电源技术是一个值得借鉴的方法。除了研究新型拓扑结构外,还必须关注电路参数的优化和控制策略的设计,才能提升其整体性能。

(2) 近年来,高频并网逆变技术在光伏发电领域得到了快速发展,在小型风力发电机并网方面也大有用武之地。小型风力机并网发电逆变器与光伏并网发电逆变器有一定的相似之处,因此,光伏用高频并网逆变器经过适当的技术改造,同样也可以用于小功率风力并网发电。目前,我国能够自行研制和开发的容量从 100 W 到 10 kW 共约 10 个风力发电机组品种,累计保有量超过了 1.7 MW,具有启动风速低,低速发电性好,限速可靠,运行平稳等优点,而且成本低,价格便宜。风力发电是我国近年来大力发展的可再生能源之一,它为高频并网逆变器的发展也提供了巨大的应用市场,同时高频并网逆变器的发展也拓展了风力发电的应用领域,从而大力促进风力发电的发展。国外很多大公司已开始大量采用高频并网逆变技术,并将其用于小型风光并网发电系统。

(3) 高频并网逆变器由于其优越的性能,在分布式发电、光伏建筑一体化、大型光伏电站中的应用会越来越广泛,特别在以太阳能、风能等组成的可再生能源分布式能源系统中更具应用潜力。目前与国外先进技术相比,国内在主电路拓扑、系统的 EMI, EMC 解决方案、多机并机应用、系统可靠性等问题的研究方面还有较大的差距。国外大公司,如 Xantrex、SMA、SUNPOWER 等产品比较成熟,但价格偏高,而国产产品仍需在整个性能、工艺、外观等方面持续提高。

参考文献

- [1] 沈辉,曾祖勤.太阳能光伏发电技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [2] J P Benner, L Kazmerski. Photovoltaic's Gaining Greater Visibility[J]. IEEE Spectr., 1999, 29(9): 34-42.
- [3] Soeren Baekhoej Kjaer, John K. Pedersen. A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [4] P Thøgersen, F Blaabjerg. Adjustable Speed Drives in The Next Decade: Future Steps in Industry and Academia [J]. Journal of Electric Power Components and Systems, 2004, 32(1): 13-32.

- [5] Sunny Boy 5000TL—Operating Instructions ,SMA.[DB/OL]. Available :www.sma.de.
- [6] Boost Current Multilevel Inverter and Its Application on Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems [J]. IEEE Trans on Power Elections 2006 21 (4):1116- 1124.
- [7] J M CHANG ,W N CHANG.Single-Phase Grid-Connected PV System using Three-Arm Rectifier-Inverter [J].IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems 2006 42 (1): 211- 219.
- [8] Nobuyuki kasa ,Haruki Ogawa ,Takahiko Iida.A Transformer-Less Inverter using Buck-Boost Type Chopper Circuit for Photovoltaic Power System [A].IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems , PEDS '99[C].Hong Kong ,1999 :653- 658.
- [9] S B Kjaer.Design and Control of an Inverter for Photovoltaic Applications[D].Dissertation ,Inst.Energy Technol. Aalborg University ,AalborgEast ,Denmark ,2004/2005.
- [10] Youngseok Jung ,Gwonjong Yu ,Jaeho Choi ,et al.High-frequency DC Link inverter for Grid-connected Photovoltaic System [A].Photovoltaic Specialists Conference 2002.Conference Record of the Twenty-ninth IEEE[C].2002 : 536- 541.
- [11] M Meinhardt ,T O'Donnell ,H Schneider ,et al.Miniaturised "LowProfile" Module Integrated Converter for Photovoltaic Applications with Integrated Magnetic Components [A]. IEEE APEC '99[C].1999 ,(1):305- 311.
- [12] R Teodorescu ,F Blaabjerg ,J Borup ,et al.A New Control Structure for Grid-connected LCL PV Inverters with Zero Steady-state Error and Selective Harmonic Compensation [A].IEEE APEC '04[C].[SI.] 2004 ,(1):580- 586.
- [13] S B Kjaer ,F Blaabjerg.Design Ptimization of a Single Phaseinverter for Photovoltaic Applications[A].IEEE PESC '03[C].2003 ,(3):1183- 1190.
- [14] Ashoka K Sbhat ,SB Dewan.A Novel Utility Interfaced High-Frequency Link Photovoltaic Power Conditioning System [J].IEEE Trans. on Industrial Electronics ,1988 ,35 (1): 153- 159.
- [15] E Koutroulis ,J Chauakis ,K Kalaitzakis ,et al.A Bidirectional ,Sinusoidal ,High-frequency Inverter Design[J].IEEE Proc-Electr. Power Appl. 2001 ,148 (4) :315- 321.

(上接第 36 页)期间故障相对应电机绕组悬空,电机运行于不对称故障下,致使电机磁链 发生图 5c 所示的变化,进而导致 T_n 发生变化。逆变器重构切换完成后系统很快恢复稳定状态,但 n 有较大的下降。如前所述,四开关逆变器只能提供 4 个电压矢量,而所提供的电压矢量轨迹比六开关逆变器提供的电压矢量轨迹幅值有很大减小。因此,若不采用弱磁控制方式和相同的直流母线电压,将使四开关逆变器供电驱动系统的转速比六开关逆变器供电驱动系统的低。同时故障后系统转矩脉动明显增大,这也体现了六开关逆变器和四开关逆变器供电对系统的不同效果。

图 5b 为 A、B 相电流波形。假设 A 相为故障相,那么在将 A 相电机绕组从逆变器开关器件改接到直流母线电压中点的过程中该相电流为零。逆变器重构实验切换过程约需时 80 ms,其中包含了模拟出错信号脉冲持续时间和 V_T 开通所需时间。由实验结果可见,采用所设计的容错辅助控制电路可以实现容错逆变器的正确重构切换。由于实验中采用的示波器只有两个通道,难以同时记录手动模拟故障脉冲和其他波形,故图 5 波形显示的故障发生时间不完全相同。

5 结 论

对容错逆变器驱动永磁同步电机直接转矩控制系统中的电压矢量进行了讨论,指出了逆变器故障前后六开关和四开关供电系统在驱动系统运行能力

上存在的差异。通过正确的时序控制,采用设计的容错辅助控制电路,实现了容错逆变器的正确、安全重构。模拟单相故障下容错逆变器的重构运行实验结果说明,三相六开系统在故障时能平滑切换至三相四开系统,这说明系统实现连续运行是可行的,同时也说明四开关供电系统运行性能略差。

参 考 文 献

- [1] Welchko B A ,Lipo T A ,Johns T M.Fault Tolerant Three-phase AC Motor Drive Topologies a Comparison of Features ,Cost and Limitations [J].IEEE Trans. on Power Electronics 2004 ,19 (4) :1108- 1116.
- [2] Mendes ,A M S ,Cardoso ,et al.Fault-Tolerant Operating Strategies Applied to Three-Phase Induction-Motor Drives [J].IEEE Trans. on Industrial Electronics , 2006 , 53 (6) : 1907- 1818.
- [3] 何宗元 ,孙 丹 ,贺益康 ,PMSM DTC 系统的三相四开关容错运行[J].电力电子技术 ,2007 41 (2) :6- 9.
- [4] 孙 丹 ,贺益康 ,何宗元.基于容错逆变器的永磁同步电机直接转矩控制[J].浙江大学学报 (工学版) ,2007 41 (7) :1101- 1106.
- [5] Ribeiro R L D A ,Jacobina C B ,Da Silva E R C ,et al. Fault-olerant Voltage-fed PWM Inverter AC Motor Drive Systems[J].IEEE Trans. on Industrial Electronics ,2004 ,51 (2) :439- 446.
- [6] ZHONG L ,RAHMAN F.Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J].IEEE Trans. on Power Electronics ,1997 ,12 (3) :528- 536.