

光伏并网逆变器的电路拓扑及其关键技术

唐 洲, 唐海燕, 廖 兵, 廖远辉, 朱世武

(南车电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 介绍了目前市场上光伏并网逆变器的种类及相关电路拓扑, 并针对光伏并网逆变器的相关设计参数、工作原理进行了阐述及说明。

关键词: 太阳能光伏发电; 并网逆变器; 电路拓扑

中图分类号: TM464; TM615

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)06-0036-05

Circuit Topology of Solar Photovoltaic Grid-connected Inverter and Its Key Technologies

TANG Zhou, TANG Hai-yan, LIAO Bin, LIAO Yuan-hui, ZHU Shi-wu

(CSR Research of Electrical Technology & Materials Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It introduced the types of solar photovoltaic grid-connected inverter and related circuit topologies in the current PV market, and elaborated the corresponding technical parameters and working principles.

Key words: solar photovoltaic; grid-connected inverter; circuit topology

0 引言

太阳能等清洁能源的大规模应用将是21世纪人类社会发 展进步的一个重要标志。早期太阳能光伏发电逆变器作为独立的电源给家用电器及照明设备供电, 主要用于无电或缺电的边远地区。但目前随着电力紧张、环境污染等问题的日趋严重, 与公用电网并网运行的光伏并网发电逆变器已显出其越来越大的竞争力。近几年光伏系统安装规模的逐渐增大, 光伏逆变器的市场随之急剧放大, 后期将与光伏装机容量同步, 保持高速增长。2012年预计装机容量超过4 GW, 其中光伏建筑装机容量将达到1.7 GW。在中国政府“屋顶计划”、“金太阳工程”和即将出台的新兴能源产业规划等政策刺激下, 到2020年光伏累计安装量将达20 GW以上, 年复合增长率46%, 预计2020年国内光伏逆变器市场的需求量约为18.6 GW。光伏系统分为并网及离网系统, 相对应光伏逆变器也有并网及离网之分, 一般并网系统的

逆变器容量与光伏系统容量一致, 而离网系统的逆变器容量取决于负载容量和负载性质等, 一般小于光伏系统容量。根据全球光伏系统安装历史统计数据, 光伏并网逆变器在光伏系统总装机容量中占绝对比例, 在政府并网发电补贴条件下, 比例达90%以上。现阶段光伏并网逆变器已成为各厂商投入开发的重点, 其技术指标代表了光伏逆变器技术水平的高低。

1 光伏并网逆变器种类

目前市场上光伏并网逆变器种类众多, 按工作变换方式和输出特性参数, 大体上可以分为4大类:

(1)按逆变电路的工作变换方式可分为高频逆变器和工频逆变器;

(2)按输出的交流相数可分为单相逆变器和三相逆变器;

(3)按输出的波形可分为正弦波逆变器和非正弦波逆变器;

(4)按逆变器的稳定输出参量可分为电压源逆变器和电流源逆变器。

以下详细介绍按逆变器的稳定输出量分类的两种

收稿日期: 2012-07-26

作者简介: 唐洲(1981-), 男, 工程师, 研究方向为太阳能功率变换器。

逆变器原理:

(1)电压源逆变器。其直流输入侧并联大电容作储能,经电容滤波、稳压后相当于恒压源向直流输入侧后端电路提供恒定的电压。逆变桥输出电流大小由负载决定,电流的波形由负载的性质决定。其电路原理图如图1所示。

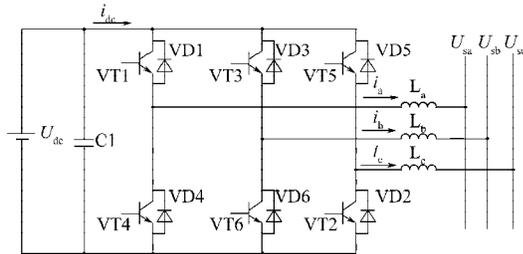


图1 电压源逆变器

Fig.1 Voltage source inverter

(2)电流源逆变器。其直流输入侧串联大电感作储能,经电感稳流后相当于恒流源向直流输入侧后端电路提供恒定的电流。逆变桥输出电压大小由负载决定,电压的波形由负载的性质决定。其电路原理图如图2所示。

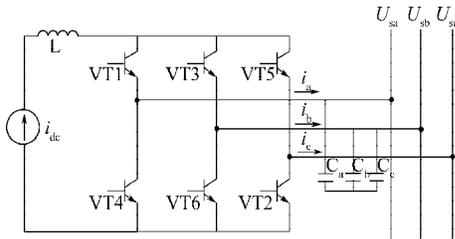


图2 电流源逆变器

Fig.2 Current source inverter

2 光伏并网逆变器的电路拓扑

目前市场上的并网逆变器根据系统中有无变压器,可分为无变压器型、工频变压器型和高频变压器型,共分为以下7种电路拓扑,它们各有利弊,优缺点如下。

2.1 直接逆变电路拓扑

直接逆变电路拓扑如图3所示。

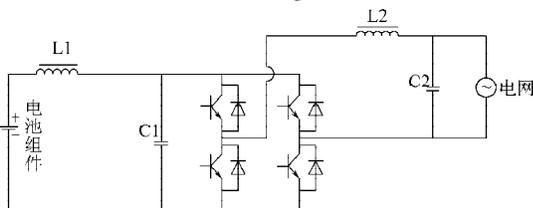


图3 直接逆变电路拓扑

Fig.3 Topology of direct inverter circuit

优点:

(1)这种电路拓扑结构简单,由于采取直接逆变可省去笨重的工频变压器,转换效率可高达99%。

(2)重量轻、成本低。

缺点:

(1)此电路拓扑输入端与输出端无电气隔离,造成了太阳能电池板与电网电压共地,对人身安全不利。

(2)由于内部无隔离变压器,输入侧的直流分量易进入到输出端的交流电网,对电网造成不利影响。

(3)此电路拓扑直流侧输入端电压需要高于350V,对太阳能电池板的电气绝缘要求较高,否则会出现对地漏电情况。

2.2 工频隔离电路拓扑

工频隔离电路拓扑如图4所示。

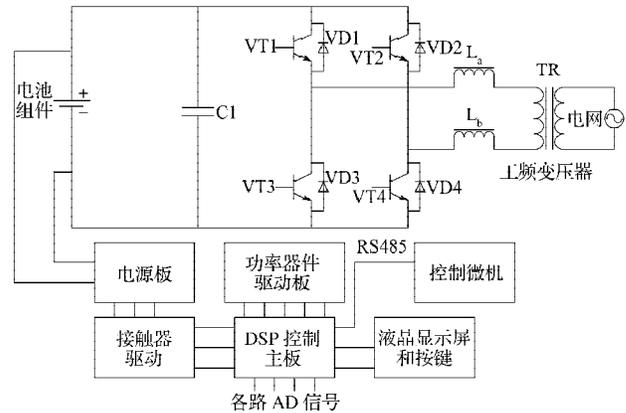


图4 工频隔离电路拓扑

Fig.4 Topology of power frequency isolated circuit

优点:

(1)此电路拓扑采用工频变压器进行电气隔离,安全性能良好、系统整体可靠性高、抗冲击性能好。

(2)此电路拓扑可直接接地。

缺点:

(1)由于此拓扑中增加了变压器损耗,系统效率相对降低。

(2)拓扑自身增加了笨重的工频变压器,设计成本、整体重量和安装空间都将大大增加。

2.3 高频隔离电路拓扑

高频隔离电路拓扑如图5所示。

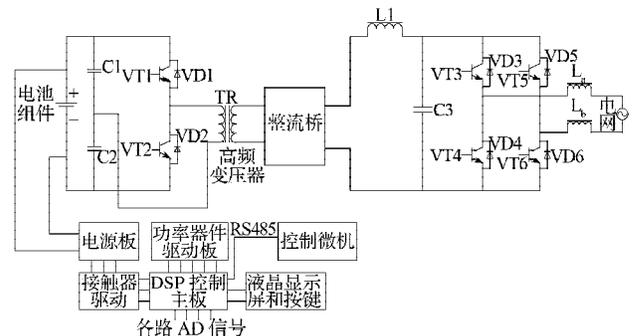


图5 高频隔离电路拓扑

Fig.5 Topology of high frequency isolated circuit

优点:

(1)与工频隔离拓扑结构相比,由于采用高频开关

信号,系统中的隔离变压器体积和重量可大大减小。

(2)此拓扑具备电气隔离和重量轻的双重优点。

缺点:

(1)受高频变压器散热的制约,DC/AC的逆变功率等级一般较小,所以这种拓扑结构集中应用在5 kW以下的光伏并网逆变器中。

(2)高频DC/AC逆变工作频率较高,一般为几十千赫兹以上,较难抑制系统的高次电源谐波。

2.4 高频升压非隔离电路拓扑

高频升压非隔离电路拓扑如图6所示。

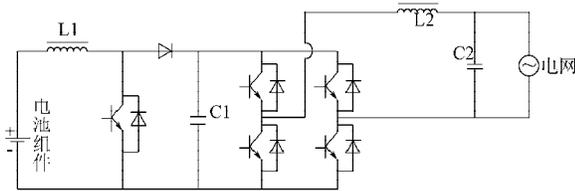


图6 高频升压非隔离电路拓扑

Fig.6 Topology of high-frequency boosting nonisolated circuit

优点:

(1)高频升压非隔离电路拓扑与直接逆变拓扑结构类似,去除了笨重的工频变压器,使得系统重量减轻、效率得到明显提升,同时增加Boost升压电路有利于提升和控制直流侧输入电压,使得系统前端太阳能电池阵列的直流输入电压可达到宽范围:150~450 V。

(2)此拓扑结构逆变电路特别适合小型、单相并网逆变器,而且适合直流电压较低的系统,采用这种拓扑结构的光伏并网逆变器在欧美市场已经成为小型、单相并网逆变器市场的主流。

缺点:

(1)高频升压非隔离电路拓扑和直接逆变拓扑结构一样,由于系统内部无电气隔离,交直流电源共地,对系统的绝缘、系统接地及人员安全不利。

(2)由于使用了高频DC/DC开关信号,系统的EMC设计难度加大。

2.5 多路MPPT、单逆变电路拓扑

多路MPPT、单逆变电路拓扑如图7所示。

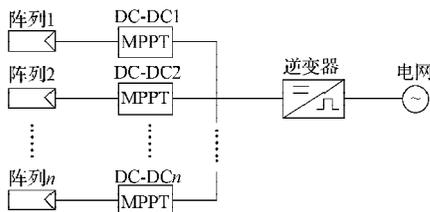


图7 多路MPPT、单逆变电路拓扑

Fig.7 Topology of multiple MPPT and single inverter

优点:

此拓扑由于具有多个DC-DC电路,即具有不同的MPPT输入回路,故适合于具有多个光伏电池组件或同一电池组件中有不同倾斜面方阵的光伏电池板组件系统,可避免太阳能电池组件参数的离散性或太阳辐射条件的差异在大规模太阳能电池组件并联情况下所造成的能量损失,系统能有效增加3%~10%的发电量,十分适合应用于电池组件分散型的光伏建筑项目。

缺点:

此电路拓扑输入、输出侧未隔离,对整个系统的绝缘、接地及人身安全不利。

2.6 逆变升压工频隔离输出电路拓扑

逆变升压工频隔离输出电路拓扑如图8所示。

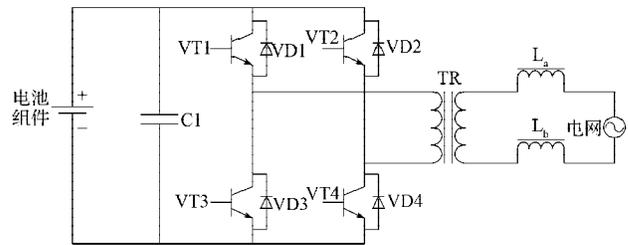


图8 逆变升压隔离输出电路拓扑

Fig.8 Topology of inverter booster isolated output circuit

优点:

此拓扑在光伏并网逆变器中应用较广泛,而且不影响系统接地、系统绝缘,不需要检测和控制交流输出侧的直流分量。

缺点:

由于在相对较低的直流电压下逆变,开关损耗以及通态损耗较高,加之工频变压器的损耗,使得逆变器整体效率较低,最高约为96%。

2.7 逆变降压接入高压电网电路拓扑

逆变降压接入高压电网电路拓扑如图9所示。

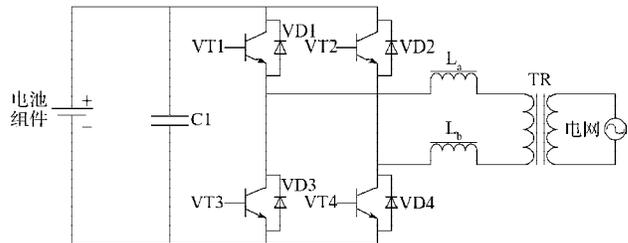


图9 逆变降压接入高压电网电路拓扑

Fig.9 Topology of inverter decompression accessing high voltage power grid

优点:

大型并网逆变器直流输入为440~900 V,经逆变降压后变为电力行业中常见的AC 270 V电压等级,因而电路拓扑中后端的电力变压器匝比可做成270 V/10 kV,大大提高了并网效率并节约了成本,同时便于当地用户选择适合电网要求的变压器。目前市场上的大功率光

伏并网逆变器均是采用此种拓扑电路。

3 光伏并网逆变器的相关技术要点

3.1 工作原理

太阳能电池组件输出的直流电压送至光伏逆变器系统前端的直流滤波器,经滤波输出后的直流电压经主断路器后,送至逆变器的直流支撑电容回路;中间

直流电压经过直流支撑电容稳压后送至逆变器模块输入端,逆变后转化成三相交流270 V/50 Hz输出;逆变模块输出的三相交流送入LCL滤波网络以滤除高次谐波;经过逆变器中的升压变压器后,将270 V/50 Hz三相交流电升压至380 V/50 Hz,然后送至输出滤波器;最后经过并网接触器送至输出断路器,由输出断路器送至电网。并网逆变器工作原理框图如图10所示。

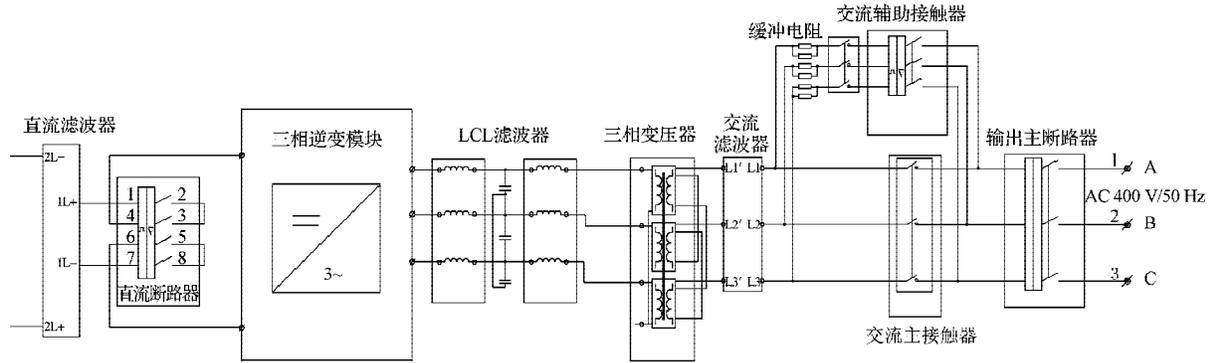


图10 光伏并网逆变器工作原理框图

Fig.10 Block diagram of the working principle of photovoltaic grid-connected inverter

其中逆变模块采用两电平三相桥式电压源电路,功率开关器件为IGBT。其作用是将恒定的直流电压

转换为三相交流电压,输出为PWM波。其原理图如图11所示。

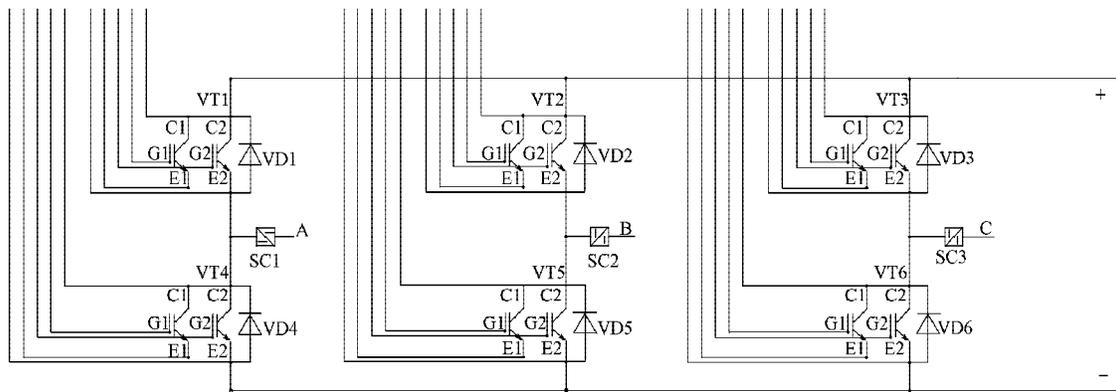


图11 逆变模块原理图

Fig.11 The principle diagram of inverter module

每相桥臂有两个IGBT元件,IGBT的开关由其门极驱动电路(GDU)控制,产生三相(A、B、C)可控的PWM波输出。

3.2 功率器件参数选择

(1) IGBT电压定额

IGBT的电压等级取决于逆变器系统的直流输入电压和IGBT关断瞬间浪涌电压,核算IGBT电压定额时只需保证上述二者之和在IGBT额定电压范围内,并预留一定的安全裕量即可。IGBT的C极和E极之间电压 U_{CE} 计算如下:

$$U_{CE} = U_{dc\max} + L_s \frac{di_{\max}}{dt}$$

式中: $U_{dc\max}$ ——系统正常运行时最大输入直流电压;
 L_s ——直流母线寄生电感; i_{\max} ——相模块正常工作时的最大输出电流。

浪涌电压 ΔU 与吸收电容大小相关,计算如下:

$$\Delta U = L_s \frac{di_{\max}}{dt} = \sqrt{\frac{L_s i_{\max}^2}{C}}$$

式中: C ——吸收电容容量。

根据 $U_{dc\max}$ 和 ΔU 两者相加的值即可推算出逆变器所用的IGBT电压等级。

(2) IGBT电流定额

IGBT电流额定值取决于模块输出最大电流,并需考虑一定的安全裕量。模块最大输出电流 i_{\max} 为:

$$i_{\max} = \frac{P}{270} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \times K$$

式中： P ——并网光伏逆变器正常运行时最大输出功率； K ——安全裕量系数。

考虑IGBT结温不均将导致IGBT元件降额运行，以及出现异常状况时IGBT元件有短时间过载工况出现，则选取的IGBT电流值应满足：

$$I = i_{\max} \times (1 + D + O)$$

式中： I ——并网光伏逆变器正常运行时一个桥臂的最大输出电流； D ——降额系数； O ——过载系数。

3.3 电气控制原理

光伏逆变器控制系统大都以微处理器为核心，实现反馈信号的处理和传感器信号的A/D转换、PWM控制脉冲的产生、故障保护、串行通信等功能。光伏并网逆变器的控制信号框图如图12所示。

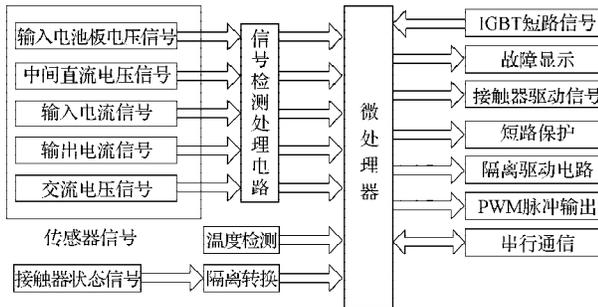


图12 系统的控制信号框图

Fig.12 The block diagram of system control signal

3.4 各种保护功能

光伏并网逆变器安装于电池板阵列与交流电网之间，应具备完善的保护功能；针对实际使用过程中出现的各种异常情况，应能使逆变器本身及系统其他部件免受损伤。

(1)输入欠压保护：当输入端的电池板电压低于额定输入电压的85%时，逆变器应启动输入欠压保护功能。

(2)输入过压保护：当输入端的电池板电压超出额定输入电压的130%时，逆变器应启动输入过压保护功能。

(3)过电流保护：逆变器的过电流保护能在负载发生短路或电流超过允许值时及时动作，使其免受浪涌电流的损伤。

(4)输出短路保护：当逆变器输出端负载发生短路时，逆变器应及时停机并切除负载，免受短路电流的损伤。

(5)输入反接保护：当输入端正、负极接反时，逆变器应有防护功能。

(6)防雷保护：由于光伏逆变器的输入输出线路均处于户外，遭雷击可能性相当大，逆变器的前后级电路中应有防雷保护。

(7)超温保护：当逆变器自身内部元器件由于非正常原因过热时应能马上停机；为了保护逆变器中的元器件避免工作在超高温环境中，影响器件寿命，出现环境温度过高时，也应能马上停机。

3.5 输出电流波形

光伏并网逆变器的输出电流波形应为平滑的正弦波。图13为实际测量的50 kW光伏并网逆变器的输出电流波形，其额定输出电流为75 A。

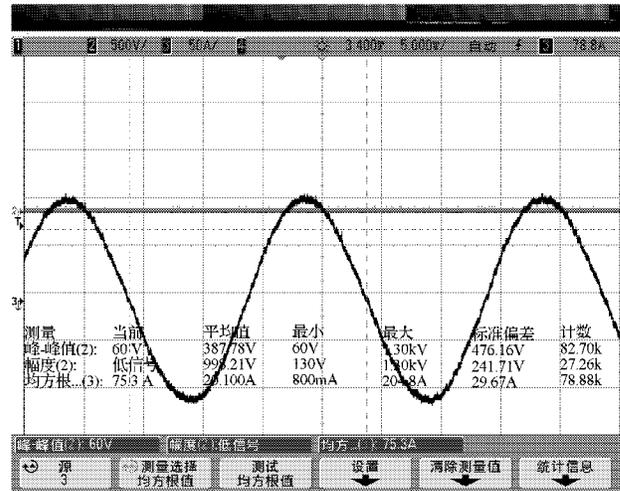


图13 50 kW光伏并网逆变器输出电流波形

Fig.13 The output current waveform of 50 kW photovoltaic grid-connected inverter

上述实测的电流波形表明：该光伏逆变器运行平稳，输出波形正弦度较好，幅值误差 $\leq 3\%$ ，满足额定输出电流值的性能指标。

4 结语

本文为太阳能光伏并网逆变器的电路拓扑设计、相关计算和应具有的保护功能提供了技术参考，实际应用时仍需详细的计算结果及充分的试验作为产品的设计依据。光伏并网逆变器目前还存在较多技术问题，主要体现在转换效率、设计规范、电网接纳等方面。针对这些问题，只有研发并推广与之相对应的关键技术，才能向电网注入真正无污染的绿色、高效电能。

参考文献：

- [1] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 赵玉文, 吴达成, 王斯成, 等. 中国光伏产业发展研究报告(2006—2007)(下)[J]. 太阳能, 2008(8): 6-13.
- [3] 赵平, 严玉廷. 并网光伏发电系统对电网影响的研究[J]. 电气技术, 2009(3): 41-44.

