

谐振过渡软开关单相 PWM 并网逆变器

史丽萍, 张建伟, 阎同东, 樊丽丽, 张文胜

(中国矿业大学 信电学院 电力系统专业, 江苏 徐州 221008)

摘要: 分析了对小功率光伏并网逆变器拓扑结构的要求, 简单介绍了几种典型的并网逆变器的拓扑结构, 指出了各个拓扑结构的优缺点、效率和适用场合。给出了一种利用软开关技术的单相全桥并网逆变器的拓扑结构(DC/AC), 分析了其工作过程, 通过谐振可以实现主功率开关的零电压开通和关断, 而且辅助开关和二极管都是零电流开通和关断, 大大减小了功率器件的开关损耗, 提高了逆变器的效率。最后, 介绍了开关器件的选择问题。

关键词: 并网逆变器; 软开关技术; 零电压; 零电流; 开关损耗

中图分类号: TM 464 文献标识码: A 文章编号: 1002-087 X(2010)01-0063-03

Resonant transition PWM soft-switching single-phase grid-connected inverter

SHI Li-ping, ZHANG Jian-wei, YAN Tong-dong, FAN Li-li, ZHANG Wen-sheng

(Power System Professional, School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China)

Abstract: The requirements of the small power grid-connected photovoltaic inverter topology were analyzed and several typical topologies were introduced. The advantages, the disadvantages, the efficiency and the applications of each topology were pointed out. A novel topology of single-phase full-bridge inverter (DC/AC) with the soft-switch technology was given and its working process was analyzed. The main power switch could be open or closed zero-voltage by resonance, and the auxiliary and switches diodes could also be open or closed zero-current, which greatly reduced the switch-wastage and improved the efficiency of the inverter. Finally, the choice of switching devices was introduced.

Key words: grid-connected inverter; soft-switch technology; zero-voltage; zero-current; switch-wastage

电能是一种极其宝贵的商品, 许多市场研究表明, 电能的需求正在按指数级不断地增长。然而, 由于电能的有限以及日益高涨的石油价格, 一个以降低电能消耗和促进替代能源研究为目标的时代即将到来。因此, 迫切需要在所有的工业和消费类应用中不断地提高效率。由于传统能源日益枯竭和人们对环境的重视, 电力系统正面临着巨大变革。太阳能发电以其独特的优点, 被公认为是技术含量高、最有发展前途的技术之一。

光伏发电系统初期投入和成本都比较高, 因而探索高性能、低造价的新型光伏转换材料是其主要的研究方向之一。另外, 进一步减少光伏发电系统的自身损耗、提高运行效率, 也是降低发电成本的一个重要途径。短期提高太阳能电池板的转换效率非常困难, 成本也很高, 但是提高逆变器的效率并非难事, 而且相对经济。故对更高效的逆变器进行投资是必然的选择, 以最具成本效益地提高逆变器效率为关键设计准则。

目前并网型系统的研究主要集中于 DC/DC 和 DC/AC 两

级能量装换的结构, 其中 DC/AC 是系统的设计关键。随着开关频率的不断提高, 消耗在开关上的能量越来越多。能耗包括稳态损耗和暂态损耗, 其中暂态损耗占主要成分, 也称开关损耗。一般指开关能耗即指暂态损耗, 即开关损耗。通过设计合理的 DC/AC 拓扑结构可以提高转换效率, 提高系统的可靠性。

本文针对小户型并网系统, 介绍了几种典型的逆变器拓扑结构, 最后提出一种利用谐振软开关技术的逆变器(DC/AC)拓扑结构, 通过这种拓扑结构可以减少高频下开关损耗, 提高逆变器的逆变效率。

1 并网逆变器典型结构

拓扑结构设计是并网逆变器系统设计的关键部分, 它关系着逆变器的效率和成本。分布式发电系统所使用的并网逆变器拓扑结构要求成本低、效率高, 而且能承受直流电压波动大、整体直流电压很低的实际情况。另外, 逆变器的输出也要满足较高的质量, 比如 THD 很小、功率因数为 1、与电网电压同频同相等。

光伏并网逆变器一般采用电压源电流控制型。电流源型直流侧需要串联一大电感提供较稳定的直流电流输入, 但由于此大电感往往会导致系统动态响应差, 市电系统可视为容

收稿日期: 2009-07-26

作者简介: 史丽萍(1964—), 女, 江苏省人, 教授, 主要研究方向为电能管理、智能电器、控制电机等。

Biography: SHI Li-ping(1964—), female, professor.

量无穷大的定值交流电压源。如果光伏并网逆变器的输出采用电压控制,则实际上就是一个电压源与电压源并联运行的系统,在这种情况下要保证系统稳定运行,就必须采用锁相控制技术以实现与市电同步,在稳定运行的基础上,可通过调整逆变器输出电压的大小及相移以控制系统的有功输出与无功输出。但由于锁相回路的响应较慢,逆变器输出电压值不易精确控制,可能出现环流等问题。综合以上所述原因,光伏并网逆变器一般都采用电压源输入、电流源输出的控制方式。图1为电压型拓扑结构。

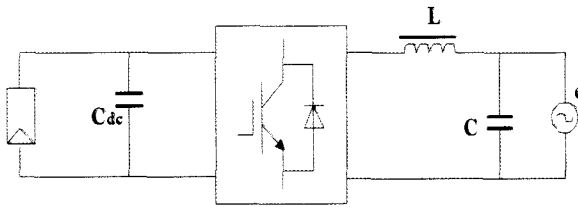
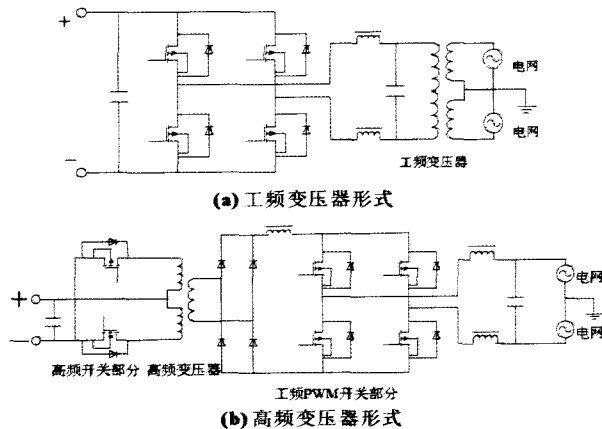


图1 电压型拓扑结构
Fig.1 Voltage-type Topology

对小功率($<5\text{ kW}$)光伏并网系统,一般采用单相全桥逆变器。半桥逆变器结构虽然简单,但输出交流电压的幅值仅为直流侧电压的一半,直流电压利用率低,开关承受的电流值变大,而且直流侧需要两个电容器串联,工作时还需要两个电容器电压的均衡。虽然全桥控制复杂,但由于使用DSP作控制芯片,所以控制部分大大简化。

并网逆变器主要拓扑结构有工频变压器形式主电路、高频变压器形式主电路和无变压器形式主电路。工频变压器形式质量大,尺寸大,在大功率并网系统中用的居多。高频变压器形式输入输出绝缘、体积小,质量轻,但是电路分为高频逆变和工频逆变,系统比较复杂,且成本高。无变压器形式电路,不采用变压器进行输入输出绝缘,只要采取适当措施,同样可以保证主电路和控制电路的运行安全,体积最小、质量最轻,而且效率最高,成本也较低。主电路包括升压部分和高频逆变部分,适应输入直流电压范围宽,有利于和光伏电池进行匹配。近年来,并网逆变器不断向无变压器非隔离型拓扑结构发展。图2为光伏发电逆变器主电路。

由于无变压器形式主电路没有变压器对输入和输出绝缘,因此逆变器的输入光伏电池的正负极不能直接接地,输出



(c) 无变压器形式

图2 光伏发电逆变器主电路
Fig.2 PV inverter main circuit

的单相三线制中性点接地,而光伏电池面积大,对地等效电容存在(正极等效电容和负极等效电容),电容将在工作中出现放电电流。其中低频部分,有可能使供电电路中的漏电开关误动作而造成停电。其中高频部分将通过配线对其它用电设备造成电磁干扰,而影响其它用电设备正常工作。对这种对地电容电流,必须在主电路加电感与电容组成的滤波器进行抑制,特别是抑制高频部分。而工频部分,可以通过控制逆变器开关方式来消除。

2 ZVT-PWM 并网逆变器及工作模式

ZVT-PWM 并网逆变器将软开关技术应用到并网逆变器,是指谐振网络与主功率开关相并联,并使主功率开关在零电压下完成开关过程的PWM变换器,称为零电压转换ZVT-PWM变换器。

光伏逆变器面临着体积更小,质量更轻,效率更高,可靠性更高等诸多要求。要达到上述要求,逆变电源必须实现工作频率由低频向高频的转变。众所周知,在硬开关方式下,不断提高逆变电源的工作频率会引起以下问题:

- (1) 开关损耗大;
- (2) 感性关断电压尖峰大;
- (3) 容性开通电流尖峰大;
- (4) 电磁干扰严重。

利用软开关技术可以实现准零电压开通和零电流关断使开关损耗近似为零。器件结电容上的电压亦近似为零,解决了容性开通问题。同时,开通时,二极管反向恢复已经结束,因此二极管反向恢复问题亦不存在, di/dt 和 du/dt 的降低使得EMI问题得以解决。

使用软开关可以省去滤波器件,这样可以使体积和质量减小。但是传统的软开关技术是在常规的PWM硬开关电路的基础上加上辅助谐振电路。与常规硬件开关电路相比,他们毫不例外地增加了电路中开关管的电压和电流应力,使电路中的导通损耗明显增加,从而部分地抵消了降低开关损耗的优点,同时,辅助谐振电路中的电感和电容由于应力造成体积增大,也部分抵消了功率变压器和滤波元件体积质量的减小。另外,传统软开关电路基本上都是把谐振元件放在电路的主功率通路上,这就不可避免的产生如下问题:首先谐振电感要承受两方面的电压,给电路的开关器件增加了额外的电压应力;其次,由于谐振电感位于主功率通路上,全部能量几乎都要通过谐振电感,这就使得电感储能极大地依赖于电压和输出负载,电路很难在一个很宽的输入电压和输出负载变化的

范围内实现软开关动作。

所以本文采用零电压转换电路,变换电路旨在解决上述软开关电路中的诸多问题,它的主要特点是把辅助谐振网络从主功率通路中移开,变为与主功率开关器件并联。在主功率开关器件变换的很短一段时间间隔内,导通辅助开关管使辅助谐振网络起作用,为主功率开关器件创造零电压或零电流的开关条件。转换过程结束后,电路又返回到常规的 PWM 工作方式。由于辅助谐振网络与主功率开关器件并联,因而使主开关器件软开关工作时,并没有增加过高的电压或电流应力;同时,辅助谐振网络并不需要处理很大的环流能量,因而减小了电路的导通损耗。另外,谐振网络所处的位置使其可以不受输入电压或输出负载的影响,电路可以在很宽的输入电压和输出负载变化范围内在软开关条件下工作。图 3 为 ZVT-PWM 逆变器。

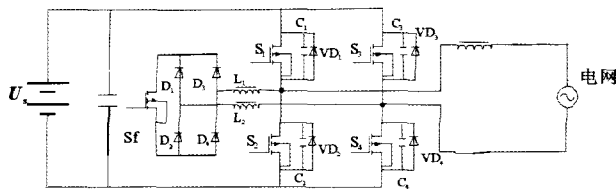


图 3 ZVT-PWM 逆变器
Fig.3 ZVT-PWM Inverter

ZVT-PWM 逆变器的工作模式如下,共分为 7 个模式:

模式 1: (t_0-t_1) t_1 时刻主开关 S_1 和 S_4 处于导通状态, S_2 和 S_3 和辅助开关 S_f 关闭状态。电流经 S_1 和 S_4 流经电网。打开辅助开关 S_f , 换流电感 L_1 和 L_2 充电, I_{Lr} 逐渐增大, 到 t_1 时刻达到最大值 I_0 。由于 di/dt 被换流电感的抑制作用, 所以 S_f 属于零电流开通。

模式 2: (t_1-t_2) t_1 时刻关闭主开关 S_4 。 L_1 、 L_2 和缓冲电容 C_3 、 C_4 发生谐振, 对 C_4 进行充电, C_3 对电感放电, t_2 时刻 C_4 两端电压为 U_s 。由于 C_4 对 du/dt 的抑制作用, 所以 S_4 关断属于零电压关断。

模式 3: (t_2-t_3) 当 $U_{C4} > U_s$, 此时续流二极管 VD_3 导通, 开始续流, C_3 两端电压被钳于零。 t_3 时刻将 S_3 打开, 由于 C_3 两端电压为零, 所以为零电压开通。

模式 4: (t_3-t_4) 电流经 S_1 和 VD_3 进行续流。 t_4 时刻关断主开关 S_1 。与前边分析一样属于零电压关断。

模式 5: (t_4-t_5) L_1 、 L_2 和缓冲电容 C_1 、 C_2 发生谐振, C_1 充电, C_2 放电。 t_5 时刻 C_1 两端电压增为 U_s 。

模式 6: (t_5-t_6) 当 $U_{C1} > U_s$, 动作模式与模式 3 相同。 S_2 以零电压方式开通。

模式 7: (t_7-t_8) 电流经 S_3 和 VD_2 续流, 关断辅助开关 S_f , 此时电感电流很小, 可认为 S_f 为零电流关断, 电流反向, 经 S_3 和 S_2 流经电网。

辅助谐振电路只工作在逆变桥开关的切换瞬间, 而开关周期的其余时间维持 PWM 调制的特点。辅助开关的工作过程一定要和 PWM 控制同步。

ZVT-PWM 拓扑结构主功率器件通常选用 MOSFET 或 IGBT。它们的寄生电容能够成为谐振网络的一部分。所以这种电路可以工作在很高的谐振频率下, 除了主功率开关切换过度的瞬间, 这种电路的工作过程和传统意义上的 PWM 电

路完全类似。

显然, 谐振电感 L_1 、 L_2 和逆变桥上电容之间的谐振是有源开关获得零电压切换的必备条件。由于所有的有源器件 ZVT 开关过程都处于 PWM 操作过程当中, 所以相对于传统的 PWM 电路, 这种拓扑电路中的开关顺序就显得比较复杂。但是采用 DSP 作为控制器件, 使控制部分变得简单。

3 开关选择

功率开关的两个选择是 MOSFET 和 IGBT。一般而言, MOSFET 比 IGBT 可以工作在更高的开关频率下。此外, 还必须始终考虑体二极管的影响, 在升压级的情况下并没有什么问题, 因为正常工作模式下体二极管不导通。MOSFET 的导通损耗可根据导通阻抗 $R_{DS(ON)}$ 来计算, 对于给定的 MOSFET 系列, 这与有效裸片面积成比例关系。当额定电压从 600 V 变化到 1 200 V 时, MOSFET 的传导损耗会大大增加, 因此, 即使额定 $R_{DS(ON)}$ 相当, 1 200 V 的 MOSFET 也不可用或是价格太高。

对于额定 600 V 的升压开关, 可采用 MOSFET。对高频开关应用, 这种技术具有最佳的导通损耗。目前市面上有采用 TO-220 封装, $R_{DS(ON)}$ 值低于 100 m Ω 的 MOSFET 和采用 TO-247 封装, $R_{DS(ON)}$ 值低于 50 m Ω 的 MOSFET。

对于需要 1 200 V 功率开关的并网逆变器, IGBT 是适当的选择。较先进的 IGBT 技术, 都针对降低导通损耗做了优化, 但代价是较高的开关损耗, 这使得它们不太适合于高频下的升压应用。本文针对屋顶光伏发电系统设计, 一般电压不会超过 600 V, 所以采用 MOSFET 管。

4 结论

无论从经济发展, 还是从环境角度来考虑, 研究光伏发电技术均具有重大现实意义, 而且近年来已得到了飞速的发展。本文从提高光伏发电系统效率的角度, 针对其主要部件——逆变器的相关研究发展进行了论述, 分析了屋顶光伏发电的几种典型并网逆变器。

本文提出了一种应用软开关的并网逆变器拓扑结构, 并分析了其工作的过程。通过谐振可以实现主功率开关的零电压开通和关断, 而且辅助开关和二极管都是零电流开通和关断, 大大减小了开关损耗。辅助谐振网络与主功率开关器件并联, 可以消除电压尖峰和浪涌电流, 极大地降低了器件的开关应力并大大提高了并网系统的效率和可靠性。

参考文献:

- [1] 林忠岳. 现代电力电子技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 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.
- [3] 王飞. 单相光伏并网系统的分析和研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [4] 刘飞, 段善旭, 徐鹏威, 等. 光伏并网发电系统若干技术问题的研究[J]. 太阳能, 2006(5): 34-37.
- [5] 许春雨, 陈国忠. ZVT 软开关三相 PWM 逆变器控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2004(11): 19-14.
- [6] 阮新波, 严仰光. 采用辅助谐波网络实现零电压开关的移相控制全桥变换器[J]. 电工技术学报, 1998(4): 13-2.
- [7] 王艳, 谢志远, 聂恩旺. 分布式发电及其并网逆变器拓扑结构的发展现状[J]. 中国电力教育, 2006(S1): 204-207.
- [8] WU Tsai-fu, LIANG Shi-han, CHEN Yu-kai. A structural approach to synthesizing soft switching PWM converters [J]. IEEE, 2003, 18(1): 38-43.