

基于通用型中点钳位电路的新型低漏电流全桥 光伏逆变器

周力为, 高峰

(山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061)

General Neutral Point Clamped Circuit of Full Bridge Inverter with Low Leakage Current

ZHOU LIWEI, GAO FENG

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

中图分类号: TM4 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2016)07-6-130

ABSTRACT: The full bridge inverter can cause high frequency common mode voltage under traditional unipolar SPWM, which limits the application in the transformerless photovoltaic grid connected inverters. The H6 inverters can attenuate the high frequency voltage pulse by constructing different freewheeling paths theoretically. However, because of the switching junction capacitance, the common mode voltage is not constant. To improve the common mode characteristic of the PV inverter, this paper firstly analyzes the equivalent common mode circuit of the full bridge inverter, then proposes a kind of general neutral clamped circuit for the single phase inverter. By connecting two diodes between the neutral of the DC capacitance and the freewheeling circuits, the common mode voltage can be constant during the freewheeling period. The proposed general neutral clamped circuit can be inserted in the different positions of the full bridge inverter, thus forming a family of low leakage current inverters. Comparing with the traditional neutral clamped inverters, the proposed topologies have less conducting loss and simpler switching strategy. The simulation and experimental results have verified the analysis of the proposed topologies.

KEY WORDS: grid connected inverter; common mode voltage; unipolar switching strategy; neutral clamped full bridge inverter

摘要: 全桥逆变器在传统单极性正弦脉宽调制下会产生高频脉动的共模电压,限制了其在非隔离型光伏并网领域的应用。H6 电路结构通过构造不同的续流回路理论上可以消除共模电压高频波动,但是由于开关结电容的存在,共模电压并不恒定。为改善光伏并网逆变器的共模特性,本文首先分析了全桥逆变器的共模等效电路,然后提出一种通用型的单相逆变器中点钳位电路,通过连接于直流电容中点的两个二极管的钳位作用,使逆变器的共模电压在续流阶段保持恒定。该通用型中点钳位电路能够钳位于全桥逆变器的不同位置,从而构成一族基于中点钳位电路的低漏电流全桥逆变器电路结构。与传统的具有中点箝位功能的 H6 电路相比,该结构

具有更低的导通损耗和更为简单的控制方式。最后仿真和实验结果显示改进的电路结构具有更低的共模漏电流和恒定的共模电压。

关键词: 并网逆变器; 共模电压; 单极性调制; 中点钳位型全桥逆变器

1 引言

在传统的光伏并网系统中,非隔离型光伏并网逆变器具有体积小、重量轻、成本低、效率高等特点,因此得到了广泛的应用^[1]。但是由于缺少变压器的隔离作用,使得光伏板和电网之间有了直接的电气连接,在高频的共模电压作用下,会产生共模漏电流,增加并网电流的谐波,降低系统效率,甚至对人身和设备的安全造成威胁^[2]。因此,抑制非隔离型光伏并网逆变器的漏电流成为研究热点之一。

在单相全桥逆变器中,传统单极性调制具有输入电压利用率高以及滤波电感电流纹波小等优点,

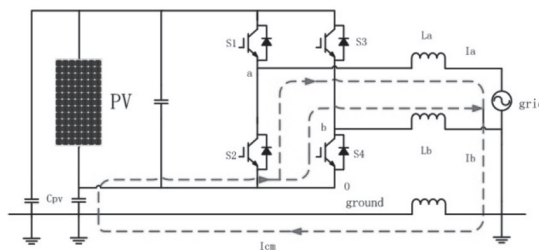


图1 全桥逆变器共模电压等效回路

受到广泛关注,但是,单极性调制同时会产生高频脉动的共模电压,并在共模谐振回路中产生漏电流。需要增加隔离变压器来消除漏电流的影响,增加了系统的体积和成本^[3-5]。为了抑制单极性 SPWM 调制策略下非隔离型全桥并网逆变器的高频共模电压,各国学者进行了深入研究,通过构造不同的续流回路,使光伏板在续流阶段与电网脱离并保持系

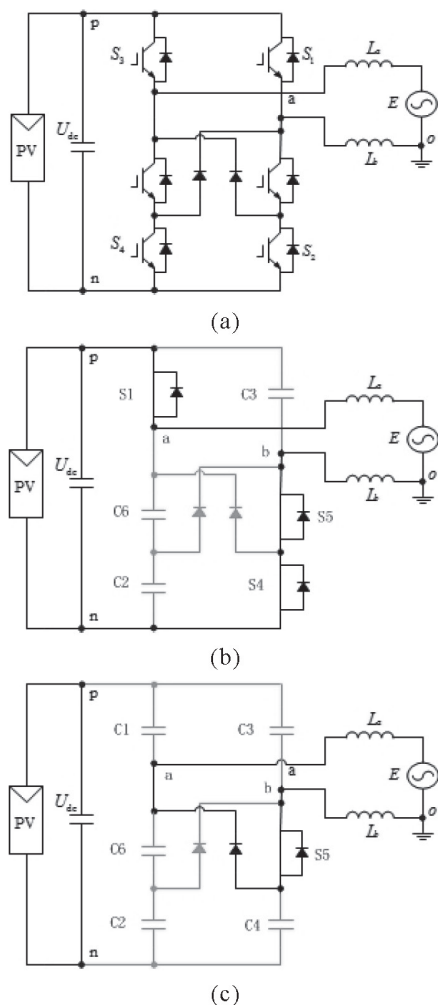


图2 H6逆变器 (a) 电路结构 (b) 功率传输模式等效电路 (c) 续流模式等效电路

统共模电压恒定, 进而抑制漏电流的大小, 如 H5, HERIC, H6 以及 HB-ZVR 逆变器等^[6-10]。但是由于开关结电容充放电的影响, 系统共模电压在续流阶段并不能保持恒定。本文首先概述了非隔离型单相光伏并网系统共模电压的等效模型, 然后分析了 H6 逆变器共模电压存在高频波动的原因, 并提出了具有中点钳位作用的 H6 逆变器拓扑结构, 对钳位电路的工作机理进行了分析, 最后通过仿真和实验验证了所提出电路拓扑的有效性。

2 传统 H6 电路共模特性分析

传统非隔离型单相光伏并网系统如图 1 所示, 在高频开关的作用下, 逆变器会产生高频脉动的共模电压, 共模电压的定义如式 (1) 所示^[1]:

$$u_{cm} = \frac{u_{ao} + u_{bo}}{2} \quad (1)$$

高频的共模电压会在光伏板的对地寄生电容

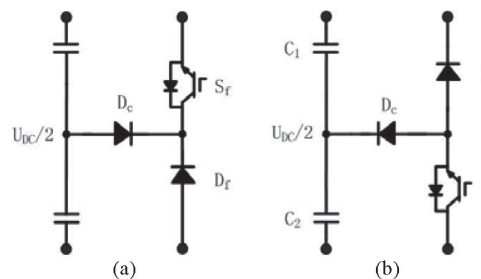


图3 通用型中点钳位电路

中产生共模漏电流, 共模漏电流的大小取决于对地寄生电容值的大小以及共模电压的脉动频率, 如式 (2) 所示^[2]:

$$i_{cm} = C_{PV} \frac{du_{cm}}{dt} \quad (2)$$

传统 H6 逆变器通过构造新的续流回路使电路在单极性调制下, 仍能在理论上保证共模电压恒定, 但是在开关导通关断的过程中结电容的充放电会使逆变器在续流状态下共模电压存在高频脉动。如图 2 所示, 以图 2(a) 中的 H6 逆变器在正半周期的工作状态为例, 在功率传输状态下, 如图 2(b) 所示, 开关 S₂, S₃ 和 S₆ 的等效结电容 C₂, C₃, C₆ 充电, u_{an} 和 u_{bn} 会保持 U_{PV} 和 0V 不变, 但是, 在续流状态下, 如图 2(c) 所示, 开关等效结电容 C₁-C₄ 和 C₆ 充电, u_{pa} 和 u_{bn} 增加, 导致 a、b 两点的电位在续流状态下产生波动, 因此 H6 逆变电路在整个工频周期内共模电压仍会产生一定程度的高频脉动, 有必要通过钳位电路对其共模特性进行改善。

3 新型中点钳位型全桥逆变器

3.1 通用型中点钳位电路

新型通用型中点钳位电路由钳位二极管和续流电路组成, 如图 3 所示。图 3(a) 中的钳位电路用于当续流回路电位低于直流侧中点电位时的电压钳位, 图 3(b) 中的钳位电路则是工作于续流回路电位高于直流侧中点电位时的情况。

3.2 一族新型中点钳位型低漏电流全桥逆变器

基于通用型的中点钳位电路, 提出一族新型中点钳位型全桥逆变电路结构, 如图 4 所示, 新型电路拓扑由光伏板、分压电容以及混合桥臂构成, 在混合桥臂中, S₁-S₄ 是全桥电路开关管, S₅、S₆ 和 D₁、D₂ 构成续流电路, 与分压电容中点相连的 D_c、D_{c'} 构成钳位电路。在续流状态下, 通过 D_c、D_{c'}

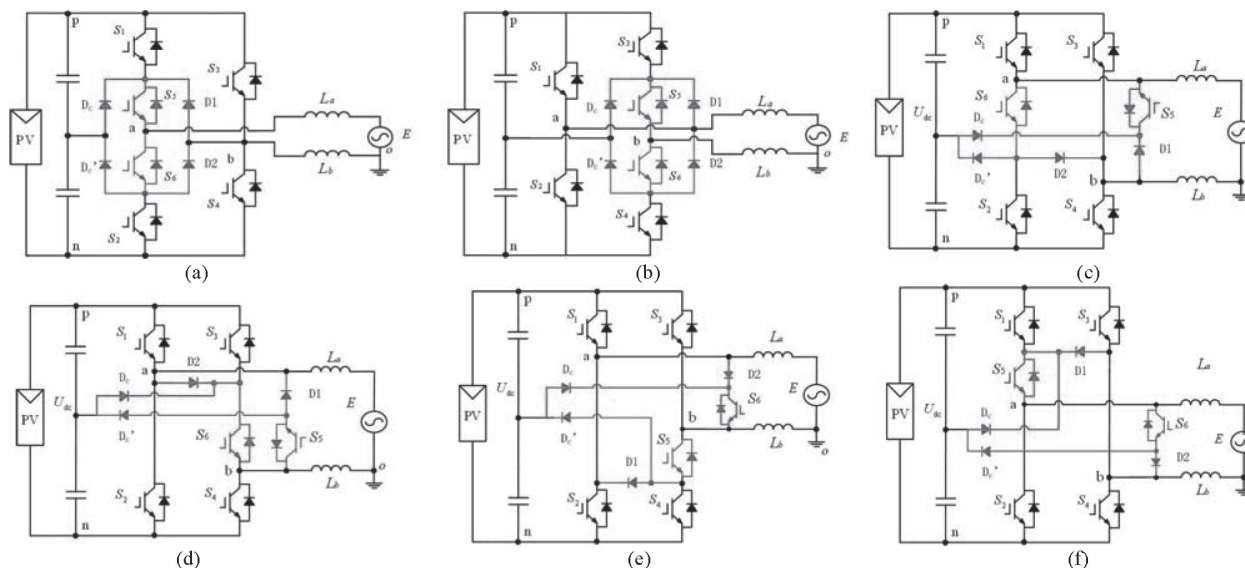


图4 一族新型单相全桥中点钳位型光伏逆变器

的钳位作用，续流回路的电位可以有效的保持在分压电容中点电位不变，进而保持共模电压在整个工频周期内恒定。

3.3 新型中点钳位全桥逆变器工作原理

以图4(b)中的电路拓扑为例，对提出逆变器工

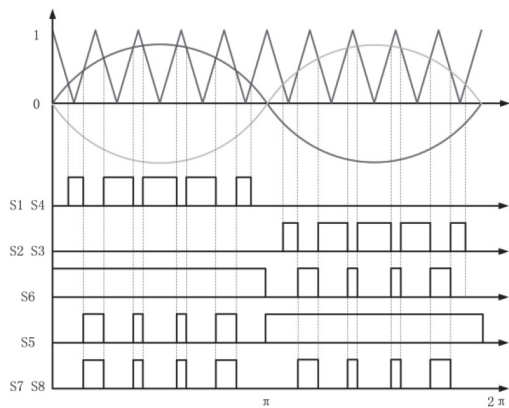


图5 提出拓扑开关信号

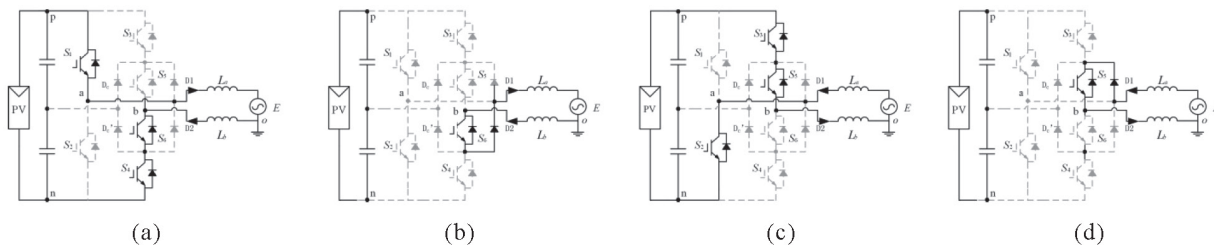


图6 四种工作模式 (a) 并网电流正半周，功率模式 (b) 并网电流正半周，续流模式 (c) 并网电流负半周，功率模式 (d) 并网电流负半周，续流模式

作原理进行分析，新型逆变电路在工频周期内有四种电流通模式，如图6(a)-(d)所示。

模式一：在电网电压正半周期， S_1 、 S_4 高频动作， S_6 持导通， S_5 与 S_1 、 S_4 互补高频动作，当 S_1 、 S_4 导通时，电流依次流经 S_1 、电网、 S_6 以及 S_4 ，共模电压为：

$$u_{cm} = \frac{u_{an} + u_{bn}}{2} = \frac{u_{dc} + 0}{2} = \frac{u_{dc}}{2} \quad (3)$$

模式二：当 S_1 、 S_4 关断时，电流依次流经 S_6 、 D_2 以及电网，共模电压为：

$$u_{cm} = \frac{u_{an} + u_{bn}}{2} = \frac{u_{dc}/2 + u_{dc}/2}{2} = \frac{u_{dc}}{2} \quad (4)$$

模式三：在电网电压负半周期， S_2 、 S_3 高频动作， S_5 保持导通， S_6 与 S_2 、 S_3 互补高频动作，当 S_2 、 S_3 导通时，电流依次流经 S_3 、 S_5 、电网以及 S_2 ，共模电压为：

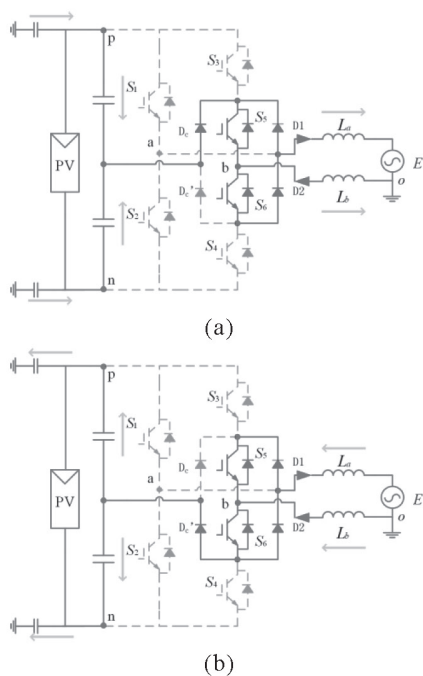


图7 并网电流正半周 (a) 续流回路电压低于分压电容中点 (b) 高于分压电容中点

表1 几种中点钳位逆变器比较

电路拓扑	开关数	二极管数	功率模式 流过器件	续流模式 流过器件
图8(a)	6	4	4个开关	2个开关
图8(b)	8	2	4(2)个开关	4个开关
提出图 4(b)电路	6	4	3个开关	1个开关, 1个二极管
提出图 4(c)电路	6	4	3(2)个开关	1个开关, 1个二极管

$$u_{cm} = \frac{u_{an} + u_{bn}}{2} = \frac{0 + u_{dc}}{2} = \frac{u_{dc}}{2} \quad (5)$$

模式四：当 S_2 、 S_3 关断时，电流依次流经 D_1 、 S_5 以及电网，共模电压为：

$$u_{cm} = \frac{u_{an} + u_{bn}}{2} = \frac{u_{dc}/2 + u_{dc}/2}{2} = \frac{u_{dc}}{2} \quad (6)$$

新型逆变电路的开关信号波形如图5中的 S_1 - S_6 所示。

3.4 钳位电路工作原理

由二极管 D_c 和 D_c' 构成的钳位电路能够在续流状态下将 a 、 b 两点的电位有效钳位在分压电容的中点。以电网电压正半周期续流状态为例，如图7

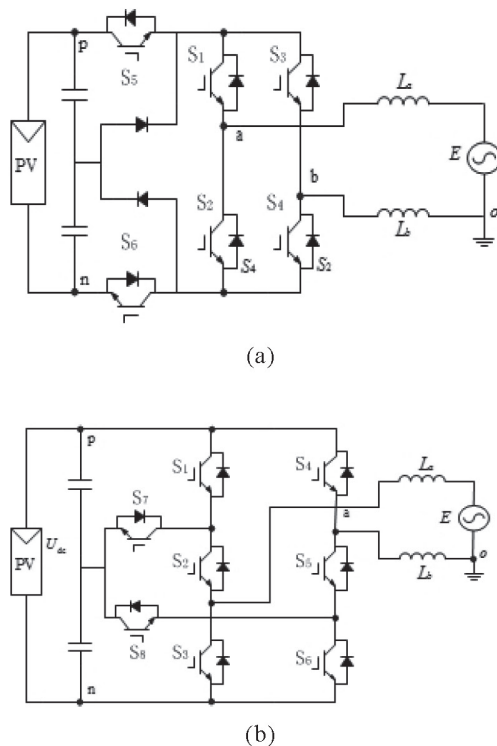


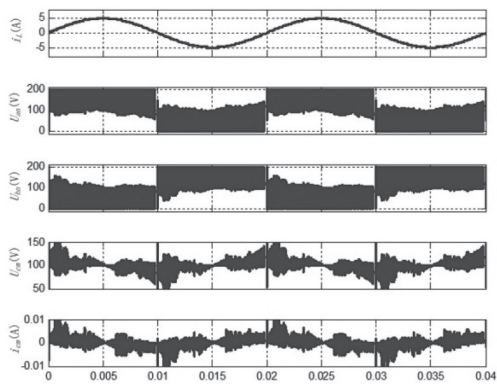
图8 (a) 文献[11]提出的电路结构 (b) 文献[12]提出的电路结构

所示，当 a 、 b 点的电位低于分压电容中点电位时，漏电流流经 D_c （如图7中黄色箭头所示），从而起到了平衡共模电压的作用。另一方面，当 a 、 b 点电位高于分压电容中点电位时，漏电流则流经 D_c' ，从而将续流回路电位钳位至直流侧中点。这样，在整个续流模式下， a 、 b 两点电位被有效钳位至分压电容中点，从而保证在整个工频周期内的共模电压恒定。

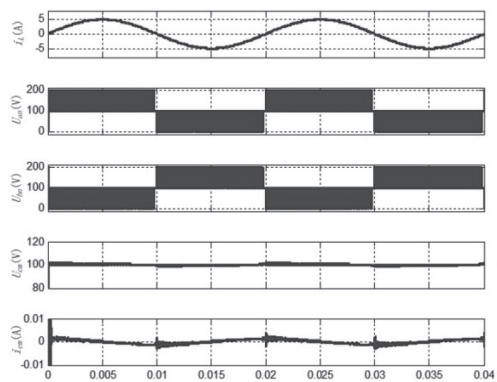
对于所提出的中点钳位全桥逆变器的开关调制策略，为了避免直流分压电容被短路，需在开关控制信号中加入死区保护，在工频正半周期内， S_1 、 S_4 与 S_5 互补控制信号之间设置死区，同理，在负半周期内，在 S_2 、 S_3 与 S_6 的互补控制信号之间设置死区。

4 几种中点钳位电路的比较

为了比较现有的单相中点钳位型全桥逆变器^[11-12]与本文提出拓扑效率情况，表1总结了图8所示逆变器与新型逆变器运行时的开关损耗。从表1中可以看出，新型中点钳位逆变器在功率传输模式下比图8(a)中电路少流经一个功率器件，在续流模式下比图8(b)中电路少流经两个功率器件，具有更低的导通损耗，并且钳位电路由二极管构成，不需要增加额外的开关管，控制复杂度较低，因此



(a)



(b)

图9 (a) 传统 H6 逆变器共模特性 (b) 提出结构共模特性

本文所提出的电路拓扑具有实际的应用意义。

5 仿真及实验结果

为了验证新型中点钳位逆变电路的有效性，在 MATLAB/Simulink 环境下进行仿真。直流电压 200V，电网电压 110V，电网频率为 50Hz，开关频率为 10kHz，滤波电感 L_a 、 L_b 均为 2mH，光伏板对地等效杂散电容为 470nF，并网电流通过一个 PR 控制器进行反馈控制，图 9(a)与图 9(b)分别为图 2 所示传统 H6 逆变器和本文提出的中点钳位型逆变器的共模特性， i_L 为逆变器并网电流， u_{an} 、 u_{bn} 分别为逆

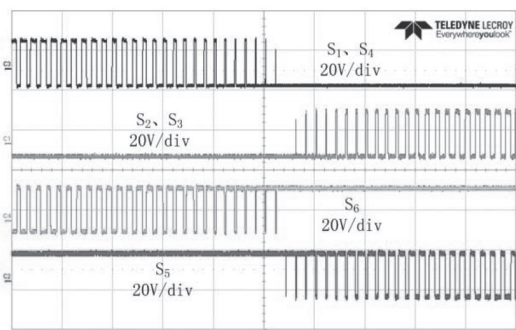


图 10 提出结构开关信号实验波形

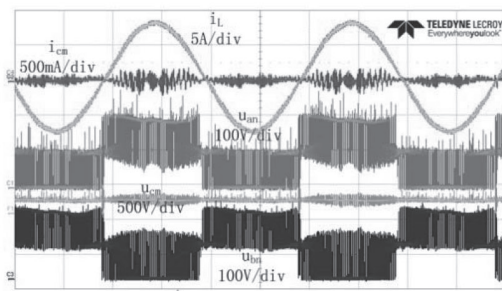
变器输出点 a、b 相对于直流电源负端 n 点的电压， u_{cm} 、 i_{cm} 分别为共模电压和共模漏电流。

为了进一步验证本文拓扑的有效性，搭建了一个 1kW 的实验样机，实验参数与仿真模型参数相同，图 10 为本文所提拓扑开关信号波形图，图 11(a)与图 11(b)分别为图 2 所示传统 H6 逆变器和本文提出的中点钳位型逆变器的共模波形图。

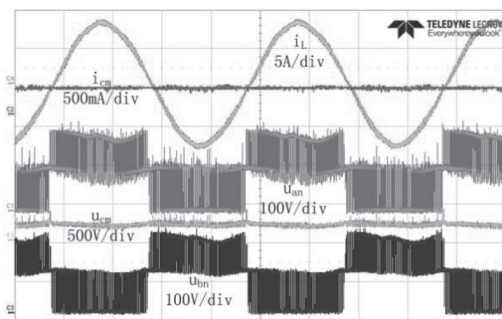
从仿真及实验结果均能看出本文所提出的中点钳位型逆变器相比于传统 H6 逆变器具有更加恒定的共模电压以及更低的漏电流，共模特性得到改善。

6 结论

传统 H6 结构非隔离型光伏并网逆变器采用单极性 SPWM 调制，具有效率高、滤波电感电流纹波小以及直流电压利用率高等优点，但是仍存在一定程度上高频脉动的共模电压。本文提出的中点钳位型逆变器能够有效消除高频共模电压，并且相比于现有中点钳位逆变器损耗更小，效率更高，不需要增加开关数量，控制简单。



(a)



(b)

图 11 (a) 传统 H6 逆变器 (b) 提出结构共模实验波形对比

参考文献

- [1] Gonzalez R, Lopez J, Sanchis P, et al. Transformerless inverter for single phase photovoltaic systems[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2007 22(2): 693-697.
- [2] Kerekes T, Liserre M, Teodorescu R, et al. Evaluation of

- three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2009, 24(9): 2202-2211.
- [3] 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, 32(18): 1-8.
- [4] Lopez O, Freijedo F D, Yepes A G, et al. Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2010, 25(1): 140-147.
- [5] Araújo S V, Zacharias P, Mallwitz R. Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2010, 57(9): 3118-3128.
- [6] M. Victor, G. Kaufungen, and B. Alheim, et al. "Method of converting a direct current voltage of a source of direct current voltage, more specifically of a photovoltaic source of direct current voltage, into an alternating current voltage," U.S Patent 7411 802 B2, 2008.
- [7] Kerekes T, Teodorescu R, Rodríguez P, et al. A new high-efficiency single-phase transformerless PV inverter topology[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 58(1): 184-191.
- [8] S. Heribert, S. Christoph, and K. Jurgen, "Inverter for transforming a DC voltage into an AC current of an AC voltage," Europe Patent 1 369 985 (A2), December 2003.
- [9] Yu W, Lai J S, Qian H, et al. High-efficiency inverter with H6-type configuration for photovoltaic non-isolated ac module applications[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. IEEE, 2010: 1056-1061.
- [10] 张兴, 孙龙林, 许颇, 等. 单相非隔离型光伏并网系统中共模电流抑制的研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(9): 1202-1208.
- [11] González R, López J, Sanchis P, et al. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2007, 22(2): 693-697.
- [12] Zhang L, Sun K, Feng L, et al. A family of neutral point clamped full-bridge topologies for transformerless photovoltaic grid-tied inverters[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2013, 28(2): 730-739.

作者简介:

周力为(1992), 男, 硕士研究生, 研究方向: 新型逆变器的设计。18769785783@163.com;

高峰(1979), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 新能源发电及并网技术、电力电子技术、微电网技术。