

# Topology of Improved H6 Single Phase Full Bridge Grid Connected Inverter with Low Leakage Current

Ming Lu, Dunxin Bian, Xiao Zhang, Jian Liu

School of Electrical and Electronics Engineer, Shandong University of Technology, Zibo Shandong  
Email: dxbian@sdut.edu.cn

Received: Feb. 6<sup>th</sup>, 2018; accepted: Feb. 20<sup>th</sup>, 2018; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Focusing on the leakage current problem of non-isolated single-phase photovoltaic grid connected inverter, an improved H6 single-phase full bridge inverter with low leakage current was proposed. The switch is added at the voltage midpoint of DC bus and the drive signal of topology is improved to change the current loop of common mode. The topology of grid current flow path and common mode voltage level in the positive and negative half cycle were analyzed during the power transmission process, and working mechanism of the improved topology was explored in detail. Moreover, voltage and current of Heric topology with improved topology were compared and the effectiveness of leakage current suppression was analyzed as well. Simulation results show that the leakage current of improved topology will be much lower than that of Heric topology, and the effectiveness of proposed improved topology in suppressing leakage currents was validated.

## Keywords

Photovoltaic, Grid-Connected Inverter, Common Mode Voltage, Leakage Current

---

# 一种低漏电流六开关单相全桥并网逆变拓扑

逯明, 边敦新, 张潇, 刘剑

山东理工大学, 电气与工程学院, 山东 淄博  
Email: dxbian@sdut.edu.cn

收稿日期: 2018年2月6日; 录用日期: 2018年2月20日; 发布日期: 2018年2月28日

## 摘要

针对非隔离型单相光伏并网逆变器中的漏电流问题,提出一种改进型低漏电流六开关单相全桥逆变器拓扑,通过在直流侧母线电压中点处增加开关管,并改进该拓扑的开关驱动信号,改变共模电流回路。分析了功率传输过程中改进拓扑结构的并网电流在正半周期和负半周期的流通过程及共模电压水平,对改进拓扑增加的两支开关管和二极管全桥在续流阶段的工作机制进行了详细分析。对比分析了Heric拓扑与改进拓扑的电压、电流及对漏电流抑制的有效性。仿真表明改进拓扑的漏电流远低于Heric拓扑,验证了提出的改进拓扑结构在抑制漏电流方面的有效性。

## 关键词

光伏, 并网逆变器, 共模电压, 漏电流

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

光伏并网逆变器是向电网输送功率的能量变换装置,同时在电网故障时具有孤岛保护功能[1]。与隔离型并网逆变器相比,非隔离型并网逆变器不含工频变压器,其具有效率高、成本低、体积小等优势[2]。功率器件的高频开关导致了的高频共模电压,实际中光伏阵列是由多个光伏组件通过串并联构成,存在较大的对地寄生电容,高频共模电压作用于光伏组件的对地寄生电容上,产生高频的共模电流,即漏电流[3]。

高频漏电流使光伏系统的传导和辐射干扰变得严重,增加了并网电流的谐波和系统损耗[4],严重时还会导致人身安全受到威胁。

抑制光伏系统中的漏电流是解决非隔离型光伏逆变器并网技术的关键问题之一[5],抑制漏电流的最常见方法是改变逆变器的拓扑,构造新的续流回路,在逆变器开关周期的续流阶段使光伏电池的输出端和电网侧解耦,防止共模回路的形成,其中最具代表性的拓扑结构是H5、H6、和Heric拓扑结构[6] [7] [8] [9]。这些拓扑结构都是通过增加开关器件的数量来改变续流回路的传输路径,进而达到抑制漏电流的目的。H5拓扑是通过在H4桥上增加一个开关管,其缺点是在并网阶段电流必须流过增加的开关管,导致开关管的导通损耗增加,但H5桥相比其他拓扑结构增加的开关数量最少,控制方式简单,成本较低。H6桥拓扑结构的研究和改进较多,通过增加两个开关管,形成续流回路,使光伏电池板与电网间保持脱离。H6拓扑结构形式多变,但需要对开关管的开通顺序进行优化,以达到效率最优,进一步提高效率则受到MOSFET和IGBT的性能限制。

Sunways公司提出的Heric拓扑在输出端之间并入两个开关管,其作用相当于在共模回路中串入一个很大的阻抗,使漏电流水平降到一个较低的水平。Heric拓扑的优点是效率较高,保持了单极性调制电流谐波较低的优势,在并网发电阶段没有增加开关管的损耗[10]。Heric拓扑可以认为是改变了交流回路,而H5和H6桥的结构则是通过改变直流回路拓扑实现抑制漏电流的目的。

本文通过在单相全桥直流侧电压中点加入两个开关管,在交流侧增加二极管续流回路实现桥臂中点

电压与直流侧电压一半相等，得到一种改进的非隔离型单相全桥逆变拓扑，使改进拓扑能够维持逆变系统共模电压为恒值，消除漏电流。详细分析改进拓扑的工作原理及工作状态，并与现有的效率较高的 Heric 逆变拓扑进行损耗比较。最后对该拓扑和 Heric 拓扑进行仿真对比分析，进而得到改进拓扑结构与 Heric 拓扑在抑制漏电流方面的性能对比。

## 2. 漏电流产生原因分析

单相系统和三相系统分析漏电流的基本流程相似。本文以非隔离型单相全桥并网逆变器为例，如图 1 所示，简要阐述漏电流的产生过程及其计算公式。其中  $E$  为电网电压； $L_a$ 、 $L_b$  为并网接口电感； $C_{PV}$  为光伏阵列的对地寄生电容； $C$  为单相桥路输出端与大地的寄生电容； $L_g$  为逆变器和电网回路的接地电感。

单相系统的简化共模模型如图 2 所示。其中  $U_{cm\_ab}$  为共模电压； $U_{dm\_ab}$  为差模电压；计算公式如下，

$$U_{cm\_ab} = \frac{U_{an} + U_{bn}}{2} \quad (1)$$

$$U_{dm\_ab} = \frac{(U_{an} - U_{bn})(L_a - L_b)}{2(L_a + L_b)} \quad (2)$$

系统总共模电压为：

$$U_{tcm} = U_{cm\_ab} + U_{dm\_ab} = \frac{U_{an} + U_{bn}}{2} + \frac{U_{ab}(L_a - L_b)}{2(L_a + L_b)} \quad (3)$$

如式(3)所示，当  $L_a \neq L_b$  时， $U_{dm\_ab}$  会直接影响系统总共模电压  $U_{tcm}$  的大小。但一般情况下，并网接口电感  $L_a$  和  $L_b$  取值相同，那么式(3)就化简为：

$$U_{tcm} = U_{cm} = \frac{U_{an} + U_{bn}}{2} \quad (4)$$

共模电流的计算公式如式(5)所示，

$$i_{cm} = C_{PV} \frac{dU_{tcm}}{dt} \quad (5)$$

当  $U_{tcm}$  的值恒定时， $U_{tcm}$  可看做一个直流源，电感被短路，电容  $C_{PV}$  承受电压  $U_{tcm}$ 。根据式(5)可知，系统共模电流为零。

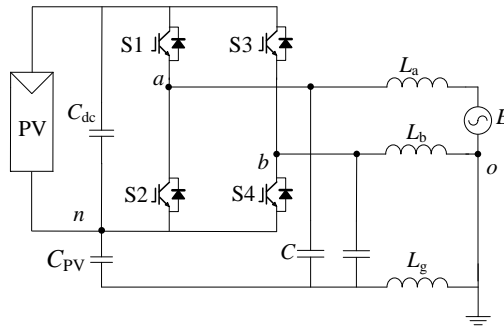
## 3. 改进拓扑的构成及原理分析

### 3.1. 改进拓扑的构成

本文提出的改进拓扑在单相全桥拓扑的基础上增添了两个开关管和一个由四个二极管组成的全桥，如图 3 所示。其中  $E$  为电网电压； $L_a$ 、 $L_b$  为并网接口电感； $C_{PV}$  为光伏阵列的对地寄生电容； $L_g$  为逆变器和电网间的接地电感。 $U_{an}$  和  $U_{bn}$  分别是桥臂中点 a、b 与 n 点的电位差。

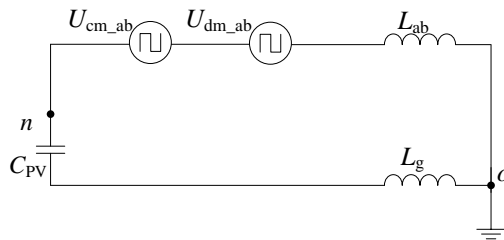
### 3.2. 工作原理

下面分析改进拓扑一个完整工作周期的工作模式，图 4 为改进电路的开关管驱动信号时序图，在正半周期内，开关 S1 和 S4 高频导通，开关 S5、S6 的驱动信号与 S1、S4 互补，S2、S3 在正半周期内始终关断；在负半周期内，开关 S2 和 S3 高频导通，S5、S6 的开关驱动信号与 S2、S3 互补，S1、S4 在负半周期内始终关断。开关 S1~S4 都关断电路输出电压  $U_{ab}$  为零时，处于续流阶段，开关管 S5、S6 与二极管桥 D1-D4 为电感电流提供续流回路。



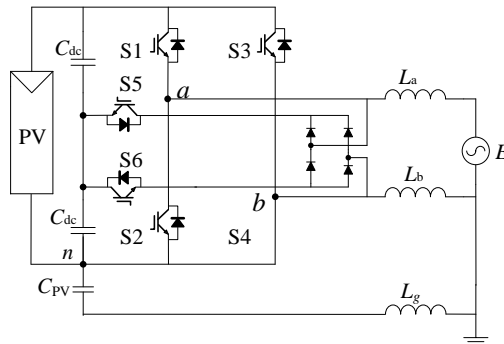
**Figure 1.** Structure of non-isolated single phase full bridge grid connected inverter

**图 1.** 非隔离型单相全桥并网逆变结构



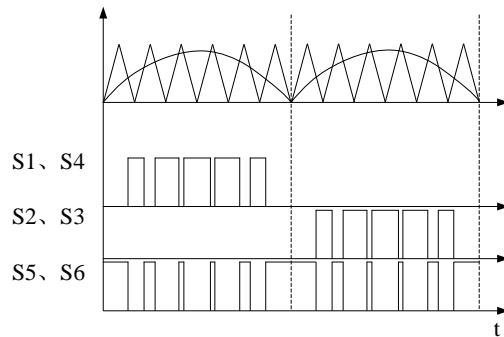
**Figure 2.** Simplified common-mode model of single-phase system

**图 2.** 单相系统的简化共模模型



**Figure 3.** Topology of improved single phase inverter

**图 3.** 改进型单相逆变器拓扑



**Figure 4.** Driving signal of improved circuit

**图 4.** 改进电路的驱动信号

表 1 表示了一个完整的工作周期内六个开关管 S1~S6 的开关状态和电压参数。由表可知，共模电压  $U_{cm}$  为常数  $U_{PV}/2$ 。满足共模电流为 0 的理论条件。

图 5(a)~(d)表示了改进电路一个工作周期内的 4 种工作模式，每种状态下的共模电压如式(4)进行计算。

工作状态 1: 在正半周期内，输出正电压: S1 和 S4 导通，其余开关管关断，光伏组件向电网侧输送功率，如图 5(a)所示。  $U_{an} = U_{PV}$ ，  $U_{bn} = 0$ ，  $U_{ab} = U_{PV}$ ， 共模电压为  $0.5U_{PV}$ 。

工作状态 2, 正半周期内输出零电压: 开关管 S1-S4 关断, S5、S6 导通。S5、S6 与二极管桥 D1-D4 为电感电流提供回路, 电感电流方向与工作状态 1 相同, 如图 5(b)所示。由于开关管 S5、S6 连接到直流链路两个分压电容的中点, 桥臂中点电位是光伏输出电压  $U_{PV}$  的二分之一, 即  $U_{an} = U_{bn} = 0.5U_{PV}$ ，  $U_{ab} = 0$ ， 共模电压为  $0.5U_{PV}$ 。

Table 1. Switch states and voltage parameters for improved topology S1 - S6

表 1. 改进拓扑 S1~S6 的开关状态和电压参数

S1	S2	S3	S4	S5	S6	$U_{an}/V$	$U_{bn}/V$	$U_{cm}/V$	$U_{ab}/V$	
1	0	0	1	0	0	$U_{PV}$	0	$U_{PV}/2$	$U_{PV}$	P
0	0	0	0	1	1	$U_{PV}/2$	$U_{PV}/2$	$U_{PV}/2$	0	
0	1	1	0	0	0	0	$U_{PV}$	$U_{PV}/2$	$-U_{PV}$	N
0	0	0	0	1	1	$U_{PV}/2$	$U_{PV}/2$	$U_{PV}/2$	0	

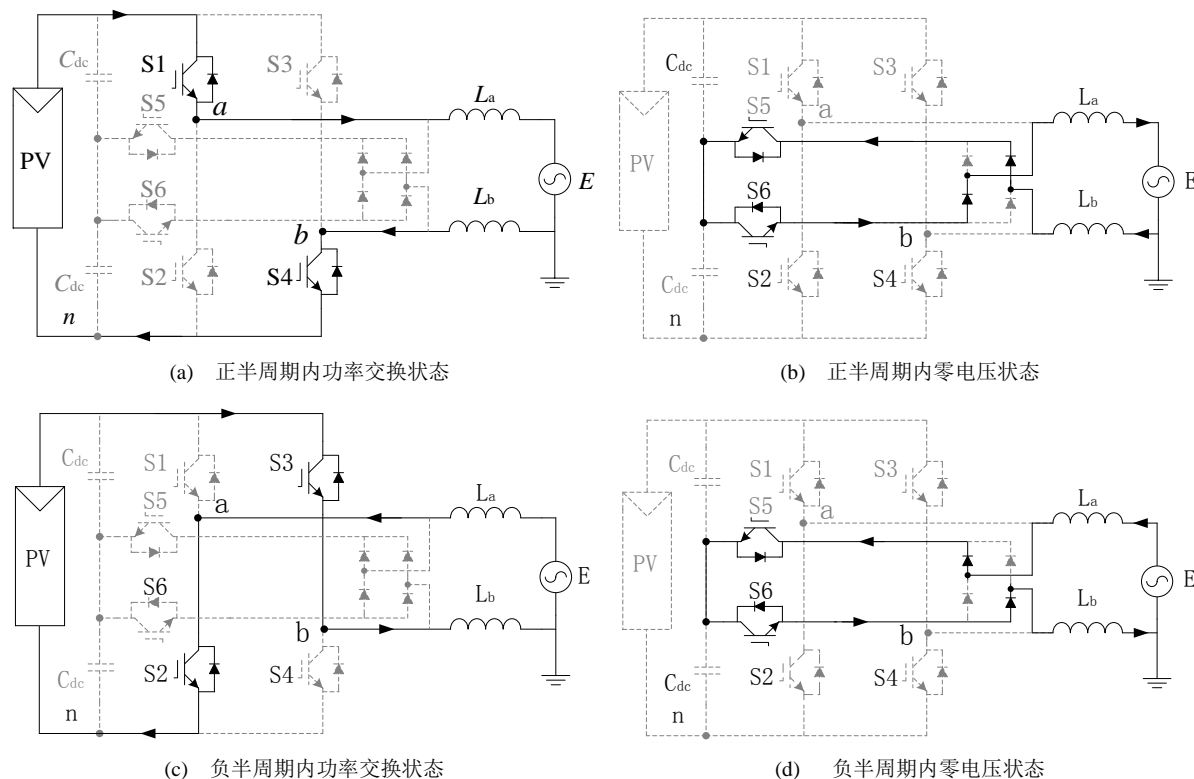


Figure 5. 4 states in a cycle

图 5. 一个周期内的 4 种状态

工作状态 3, 负半周期内, 输出负电压: S2 和 S3 导通, 其余开关管关断, 光伏组件向电网侧输送功率, 如图 5(c)所示。  $U_{an} = 0$ ,  $U_{bn} = U_{PV}$ ,  $U_{ab} = -U_{PV}$ , 共模电压为  $0.5U_{PV}$ 。

工作状态 4, 负半周期内输出电压  $U_{ab} = 0$  时, S1-S4 关断, S5、S6 导通。开关管 S5、S6 与二极管桥 D1-D4 为电感电流提供回路, 电感电流方向与工作状态 3 相同, 如图 5(d)所示。桥臂中点电位是光伏输出电压的二分之一, 即  $U_{an} = U_{bn} = 0.5U_{PV}$ ,  $U_{ab} = 0$ , 共模电压为  $0.5U_{PV}$ 。

经过分析一个完整工作周期的不同工作状态, 表明了改进拓扑处于续流阶段时, 由于 S5、S6 连接到直流侧分压电容的中点, 桥臂中点对  $n$  点电位差  $U_{an}$  和  $U_{bn}$  是光伏组件输出电压的一半, 共模电压在整个工作周期内四种工作状态下都保持不变, 可以看做一个稳定的恒流源, 从而抑制了共模电流, 优化了拓扑的共模特性。

### 3.3. 与 Heric 拓扑进行对比

Heric 拓扑效率高抑制漏电流的能力突出, 是目前实际应用中最常见的非隔离型全桥逆变拓扑。因此选取 Heric 拓扑与本文提出的改进拓扑进行比较。Heric 拓扑如图 6 所示; 其六个开关管 S1-S6 的开关状态和电压参数如表 2 所示。

开关管是由一个 IGBT 和一个反并联二极管组成的, 因此开关管的导通损耗也由这两部分组成。当开关管闭合 IGBT 导通时, 通态电流  $I_C$  流过 IGBT, 产生一个饱和的压降  $V_{CE(SAT)}$ , 导通损耗如式(5)所示,

$$P_{CON\_IGBT} = V_{CE(SAT)} \times I_C \tag{6}$$

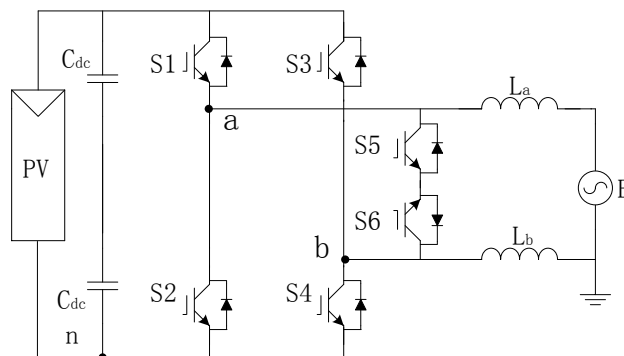
当开关管关断, 续流二极管导通时, 续流电流  $I_F$  流过反向并联的二极管, 产生一个正向电压降  $V_F$ , 二极管的导通损耗如式(6)所示,

$$P_{CON\_D} = V_F \times I_F \tag{7}$$

**Table 2.** Switching status and voltage parameters of Heric topology S1-S6

**表 2.** Heric 拓扑 S1-S6 的开关状态和电压参数

S1	S2	S3	S4	S5	S6	$U_{an}/V$	$U_{bn}/V$	$U_{cm}/V$	$U_{ab}/V$	
1	0	0	1	0	0	$U_{PV}$	0	$U_{PV}/2$	$U_{PV}$	P
0	0	0	0	0	1	$U_{PV}/2$	$U_{PV}/2$	$U_{PV}/2$	0	
0	1	1	0	0	0	0	$U_{PV}$	$U_{PV}/2$	$-U_{PV}$	N
0	0	0	0	1	0	$U_{PV}/2$	$U_{PV}/2$	$U_{PV}/2$	0	



**Figure 6.** Heric topology

**图 6.** Heric 拓扑

由表 1 可知改进拓扑在向电网输送功率时, 有两个开关管高频动作, IGBT 产生导通损耗; 在续流状态时, 各有两个 IGBT 和续流二极管产生导通损耗。由表 2 可知, Heric 拓扑在向电网侧输送功率时, 同样有两个开关管高频动作, IGBT 产生导通损耗; 处于续流状态时各有一个 IGBT 和续流二极管产生导通损耗。由以上分析可知, 处于功率传输状态时两种拓扑的开关损耗大致相同; 但是处于续流状态时, 本文提出的拓扑损耗略大于 Heric 拓扑。

#### 4. 两种拓扑的仿真研究

为了验证本文提出的改进拓扑和调制方式的可行性, 以及能否有效抑制漏电流, 利用 MATLAB/Simulink 分别对 Heric 和改进拓扑进行仿真分析。仿真步长为  $0.1 \mu\text{s}$ , 开关频率为  $10 \text{ kHz}$ , 系统参数如下: 输入直流电压,  $U_{\text{pv}} = 350 \text{ V}$ ; 直流旁路电容,  $C_{\text{dc}} = 250 \mu\text{F}$ ; 并网接口电感,  $L_{\text{a}} = 1.8 \text{ mH}$ ,  $L_{\text{b}} = 1.8 \text{ mH}$ , 光伏阵列对地寄生电容,  $C_{\text{pv}} = 100 \text{ nF}$ 。

图 7(a)为对 Heric 拓扑进行仿真所测波形, 图 7(b)为对本文所提出的改进拓扑进行仿真所测波形, 分别给出了两种拓扑的多个电压参数波形—— $U_{\text{an}}$ 、 $U_{\text{bn}}$ 、 $U_{\text{cm}}$ 。

由图 7(a)可知, Heric 拓扑桥臂中点对  $n$  点电压差  $U_{\text{an}}$  和  $U_{\text{bn}}$  震荡幅度较大, 约为  $150 \text{ V}$  与表 2 给出的理论值相差较多。其共模电压波动很大, 波形如图 7(a)所示。由图 7(b)可知, 本文提出的改进拓扑, 桥臂中点电压  $U_{\text{an}}$  和  $U_{\text{bn}}$  与表 1 的计算值相同,  $U_{\text{an}}$  在正半周期内(P)内只出现  $U_{\text{pv}}$  和  $U_{\text{pv}}/2$  两种幅值, 在负半周期(N)内只出现  $0$  和  $U_{\text{pv}}/2$  两种幅值;  $U_{\text{bn}}$  在一个完整周期内的幅值也如表 1 所示, 分析过程与  $U_{\text{an}}$  相同。改进拓扑的共模电压浮动微小, 基本在  $175 \text{ V}$  处保持恒定。

图 8(a)和图 8(b)分别给出了两种拓扑的续流电流波形。由图 8(a)可知, Heric 拓扑在正负两个半周期内续流电流大小相等方向相反, 最小导通电流约为  $0.2 \text{ A}$ , 最大导通电流约为  $11.75 \text{ A}$ 。由图 8(b)可知, 改进拓扑在一个完整工作周期续流电流方向始终相同, 与图 5 给出的理论分析一致, 电流最小约为  $0.2 \text{ A}$ , 最大约为  $11.71 \text{ A}$ 。

图 9(a)和图 9(b)分别给出了两种拓扑的逆变器输出电压和负载电压波形。为了更直观的对比两种拓扑, 分别对两种拓扑的负载电压波形进行快速傅里叶分析, 如图 10 所示。由图 10 可知, Heric 拓扑和改进拓扑负载电压 THD 分别为  $0.82\%$  和  $0.88\%$ , 均能满足并网要求, 输出电压波形良好。

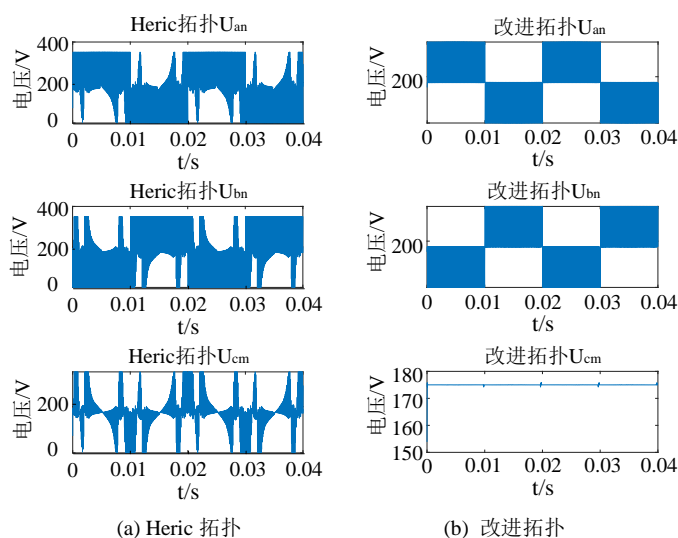


Figure 7.  $U_{\text{an}}$  (top),  $U_{\text{bn}}$  (middle),  $U_{\text{cm}}$  (bottom)  
 图 7.  $U_{\text{an}}$  (上),  $U_{\text{bn}}$  (中),  $U_{\text{cm}}$  (下)

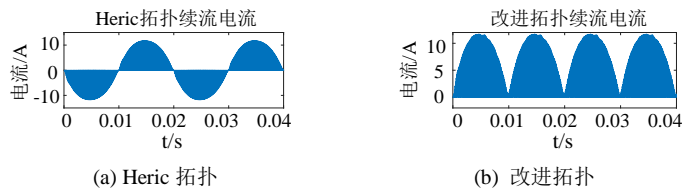


Figure 8. Waveform of freewheel current  
图 8. 续流电流波形

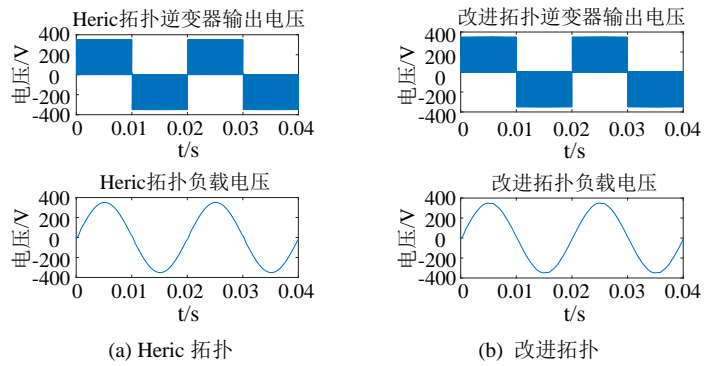
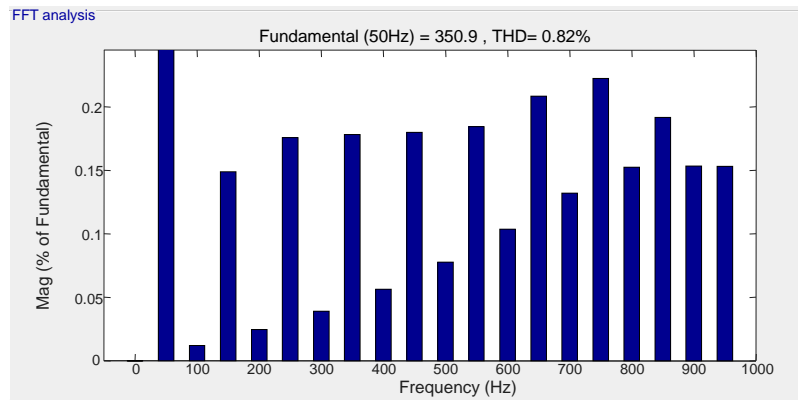
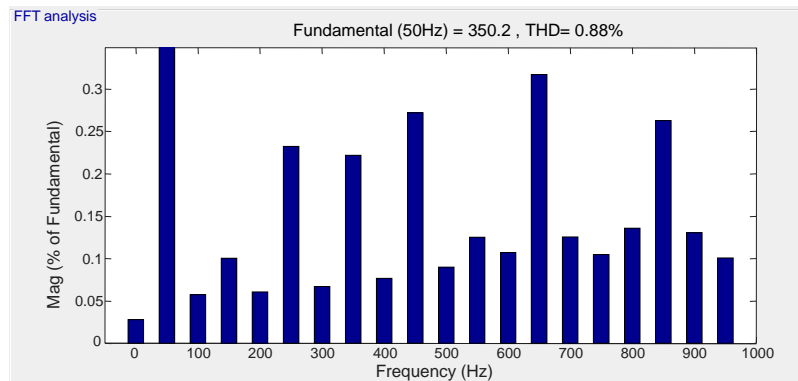


Figure 9. Inverter output voltage (top), load voltage (bottom)  
图 9. 逆变器输出电压(上), 负载电压(下)



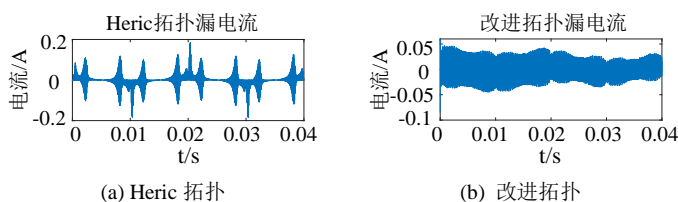
(a) Heric 拓扑



(b) 改进拓扑

Figure 10. Load voltage FFT  
图 10. 负载电压 FFT





**Figure 11.** Waveform of leakage current  
**图 11.** 漏电流波形

图 11(a)和图 8(b)分别给出了两种拓扑漏电流波形。由图 11(a) Heric 拓扑的漏电流波形可知,漏电流大小约为 0.15 A, 低于德国标准但没有被完全消除。由图 11(b)改进拓扑的漏电流波形可知,漏电流虽然未完全消除,但是幅值较小,约为 0.04 A。

通过对比可知,本文提出的改进拓扑和调制方式可行性高,能够有效的抑制漏电流的峰值,并网逆变器系统运行的安全裕度有了很大提高。

## 5. 结论

提出了一种改进型六开关非隔离型单相全桥光伏并网逆变拓扑,在基本全桥逆变拓扑的结构上增添了两个开关二极管和一个由四个二极管组成的二极管桥。新增加的两支开关管连接到直流侧分压电容的一半处,在输出功率为 0 的续流阶段中,桥臂中点电位是光伏组件输出电压的一半,理论上消除了漏电流。通过将该改进拓扑与现有的 Heric 拓扑进行对比仿真分析,仿真结果表明虽然改进拓扑的开关损耗略高于 Heric 拓扑,但是其共模电压基本为常数,可以看做一个恒流源,使得该改进拓扑的漏电流幅值远低于 Heric 拓扑,有效的抑制了非隔离型并网系统中的漏电流。

## 参考文献 (References)

- [1] Bouzguenda, M., Salmi, T., Gastli, A., *et al.* (2010) Assessment of Topologies to Minimize Leakage Currents in Transformerless PV Inverters. *2010 IEEE International Energy Conference*, 417-422.
- [2] 张犁, 孙凯, 冯兰兰, 等. 中点钳位非隔离全桥光伏并网逆变器[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(18): 16-22.
- [3] Anandababu, C. and Fernandes, B.G. (2016) Leakage Current Generation in View of Circuit Topology of Non-Isolated Full-Bridge Neutral Point Clamped Grid-Tied Photovoltaic Inverters. *IET Power Electronics*, **9**, 1571-1580. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0802>
- [4] Ardashir, J.F., Sabahi, M., Hosseini, S.H., *et al.* (2017) A Single-Phase Transformerless Inverter with Charge Pump Circuit Concept for Grid-Tied PV Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64**.
- [5] 张犁, 孙凯, 冯兰兰, 等. 一种低漏电流六开关非隔离全桥光伏并网逆变器[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(15): 1-7.
- [6] 肖华锋. 光伏发电高效利用的关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [7] Freddy, T.K.S., Rahim, N.A., *et al.* (2014) Comparison and Analysis of Single-Phase Transformerless Grid-Connected PV Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**, 5358-5369. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2294953>
- [8] Kerekes, T., Teodorescu, R., *et al.* (2011) A New High-Efficiency Single-Phase Transformer-less PV Inverter Topology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 184-191. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2024092>
- [9] 肖华锋, 谢少军, 陈文明, 等. 非隔离型光伏并网逆变器漏电流分析模型研究[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(18): 9-14.
- [10] Teodorescu, R., Liserre, M., *et al.* (2011) *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470667057>

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)