DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.1 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

一种应用于反激式光伏微逆的平面变压器设计

朱一昕，侯大成，刘淳铭，许德智
(江南大学物联网工程学院，无锡 214122)

摘要：微型逆变器可直接与光伏板连接，具有结构简单、体积小、输入输出隔离等优点。为了扩展光伏微逆功率范围，前级DC-DC部分可采用2个反激变换器交错并联，并采用有源钳位电路提高微型逆变器效率。针对户外高温环境下高频功率变压器温升高及功率密度低等问题，设计了1种应用于微型逆变器的平面变压器。首先分析了反激式微型逆变器的工作原理；其次对平面变压器的电气参数和绕组结构进行了设计，并通过Maxwell软件对平面变压器磁心磁密分布及损耗进行了仿真；最后搭建了1台220 W的交错并联反激微型逆变器样机进行实验测试。实验结果证明了设计的有效性，样机能够稳定工作。

关键词：反激微型逆变器；交错并联技术；有源钳位；平面变压器

Design of Planar Transformer for Flyback Photovoltaic Micro Inverter

ZHU Yixin, HOU Dacheng, LIU Chunming, XU Dezhi
(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A micro inverter can be directly connected to a photovoltaic board, and it has advantages such as a simple structure, a small size and input output isolation. To expand the power range of the photovoltaic micro inverter, two flyback converters can be interleaved and connected in parallel at the front stage DC-DC section, and an active clamping circuit can be used to improve the efficiency of the micro inverter. In response to the issues of temperature rise in a high-frequency power transformer and low power density in outdoor high-temperature environments, a planar transformer applied to micro inverters is designed. First, the working principle for flyback micro inverters is analyzed. Second, the electrical parameters and winding structure of the planar transformer are designed, and the magnetic density distribution and loss of the planar transformer core are simulated using Maxwell software. Finally, a 220 W interleaved parallel flyback micro inverter prototype was built for experimental testing. Experimental results proved the effectiveness of the design, and the prototype can perform stable work.

Keywords: Flyback micro inverter; interleaved parallel technique; active clamping; planar transformer

在能源枯竭问题日益严重的今天，可再生能源将是1个理想的替代品，并已经在世界各地引起了政府和工业界的广泛关注。就全球装机容量而言，光伏现在是继水电和风电之后的第三大可再生能源。由于光伏电池板价格不断下降，光伏能源也得到了比以往更多的关注[1-2]。光伏交流模块也称为微型逆变器，是1种紧凑的模块化结构，适用于小功率光伏发电系统应用。微型逆变器将来自光伏板的低直流电压转换为电网的高交流电压。与传统光伏中集中式、组串式逆变器相比，微型逆变器的优点为即插即用，在系统中具有更高的灵活性和更低的安装成本，且在阴影条件下具有更高的效率[3-4]。

微型逆变器拓扑结构可分为3类：直流母线结

收稿日期：2023-08-31；**修回日期**：2023-10-07；**录用日期**：2023-10-21；**网络首发日期**：2023-12-20
基金项目：国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(62222307)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China Youth Fund under the grant 62222307

构、伪直流母线结构和无直流母线结构[5]。其中，具有伪直流母线结构的反激式微型逆变器由于其效率高、元器件少、电路控制简单的优点而受到最大的关注[6-7]。采用交错并联式反激电路可有效扩大逆变器功率容量，故本文选择此拓扑作为微型逆变器的主拓扑。

为了使微型逆变器能够更好地适用于户外安装环境，文献[8-9]指出对于微型逆变器的功率密度、效率和器件的预计使用寿命还需进一步提高；文献[10-12]采用高边有源钳位的方法抑制反激变换器主开关管关断时的电压尖峰，并分析了高边有源钳位电路对反激变换器的影响；文献[13-14]中微型逆变器的功率变压器采用传统高频变压器设计方法进行设计，其温升较高，且功率密度仍可进一步提升。

针对目前传统功率变压器存在的主要问题，本文设计了 1 种应用于反激式微型逆变器的平面变压器，可改善热性能，满足户外高温使用环境，并可有效提高功率密度。同时交错并联的拓扑结构可以提高输出功率等级，在反激电路中加入有源钳位可有效吸收漏感能量，降低开关管电压应力，并可实现零电压开通 ZVS(zero voltage switching)，提高系统效率，实验结果证明了设计的有效性。

1 交错并联反激微型逆变器工作原理

1.1 主电路拓扑分析

为了解决传统单个反激式微型逆变器功率等级低的问题，本设计采用交错并联反激式微型逆变器拓扑，拓扑结构如图 1 所示。主功率开关管 S_{m1}、S_{m2} 的驱动信号相位相差 180°。采用有效的均流控制策略可使流过主功率开关管的电流为光伏板输出电流的 1/2，减少了流过 MOS 管的额定电流。此外，交错并联反激式微型逆变器相较于单反激式微型逆变器的输出电流纹波较小。

反激变压器一次侧上各增加 1 个辅助开关管 S_{a1} 和 S_{a2} 及钳位电容 C_{a1} 和 C_{a2}，可实现有源钳位，提高系统效率。将 P 沟道的辅助开关管与钳位电容

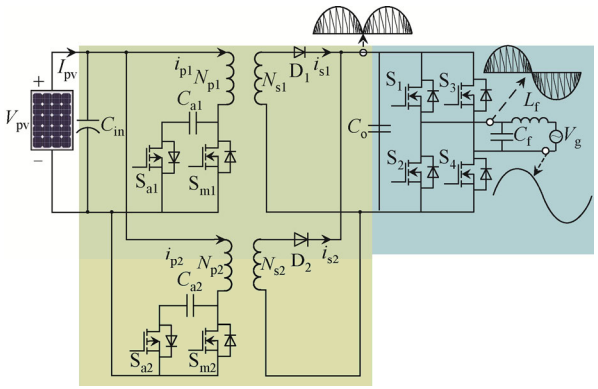


图 1 主电路拓扑

Fig. 1 Main circuit topology

串联后并联在主功率开关管两端即为低边有源钳位。在主开关管关闭和辅助开关管开通之间存在 1 个死区时间，在该时间内电流从主功率开关管或辅助开关管上的体二极管中流过，即为谐振周期，是实现 ZVS 的必要条件。

1.2 电路工作原理分析

反激电路连续导通模式电流应力低，功率器件易于选择且成本低，故本设计中反激式光伏微逆工作在连续导通模式。交错并联反激电路中的 2 路反激电路拓扑、电路参数及控制方式完全一致，故本节中对连续导通模式下的反激电路工作原理进行介绍，其在 1 个工频周期内的波形如图 2 所示。

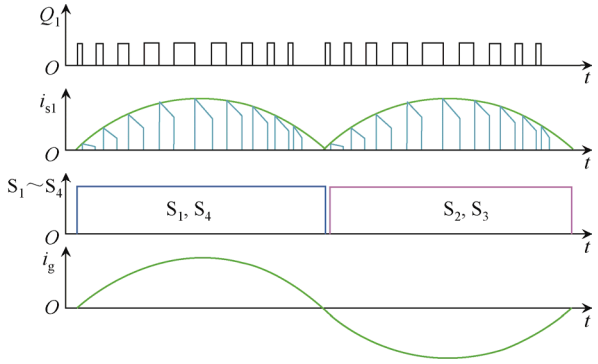


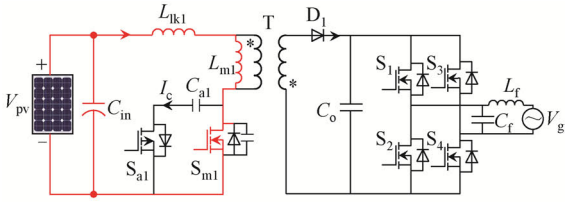
图 2 反激式光伏微逆的关键波形

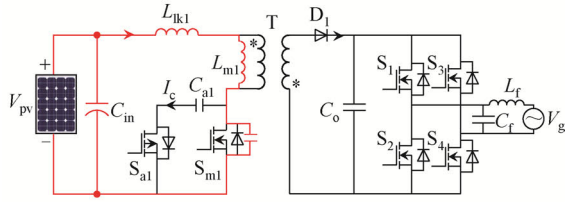
Fig. 2 Key waveforms of flyback photovoltaic microinverter

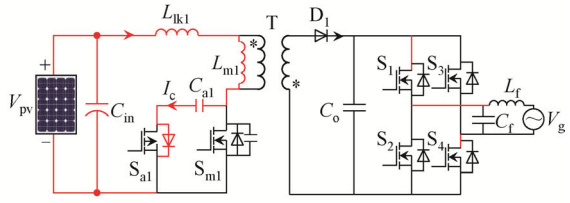
2 路交错并联反激变换器均采用正弦脉宽调制，在半个工频周期内占空比在 0 与最大占空比之间不断变化。工频周期内，变压器的一、二次侧电流呈正弦半波，经过后级 H 桥极性翻转电路和滤波器滤波后变换成正弦电流。图 2 中从上到下依次为主功率开关管的驱动信号 Q_1、二次侧电流 i_{s1}、后

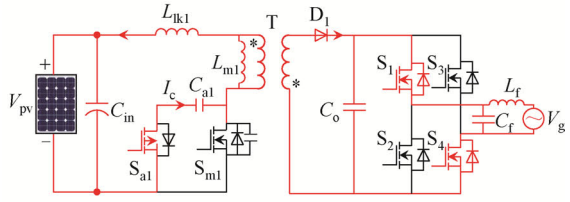
级 H 桥中开关管的驱动信号 $S_1 \sim S_4$ 及并网电流 i_g。由前述可知，交错并联拓扑结构使得流入 H 桥的电流为 2 路反激电路的输出电流之和，输出电流的纹波频率得到提高，可以降低滤波器的体积，提高功率密度。

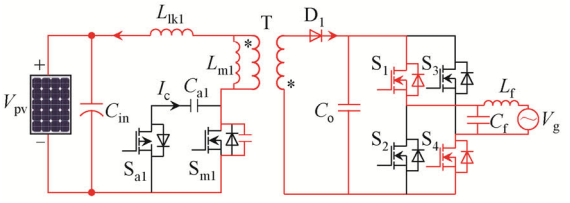
有源钳位反激变换器在1个开关周期共有 7 个阶段，各阶段的等效电路如图 3 所示。

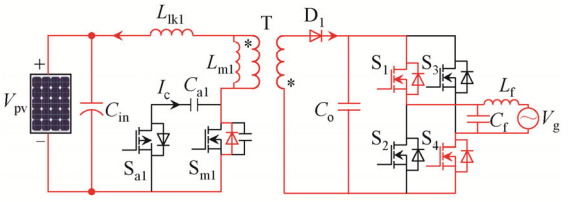

(a) 阶段1


(b) 阶段2


(c) 阶段3


(d) 阶段4


(e) 阶段5


(f) 阶段6

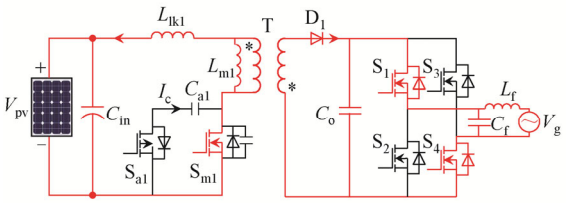

(g) 阶段7

图 3　有源钳位反激变换器工作模态

Fig. 3 Operating mode of active clamping flyback converter

2　平面变压器的设计

变压器的设计方法以电路的基本参数为基础，然后计算出绕组和磁心的参数，最后以变压器的温升验证变压器设计的合理性，变压器设计方法流程如图 4 所示。

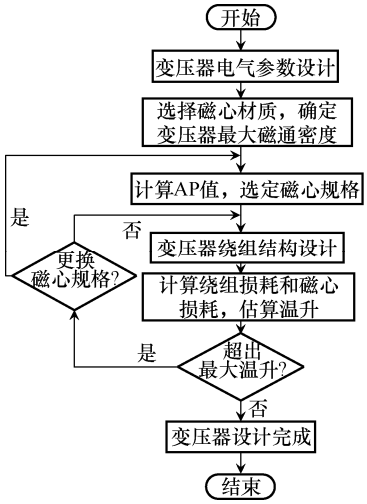


图 4　平面变压器设计方法流程

Fig. 4 Flow chart of design method for planar transformer

2.1　电气参数设计

平面变压器电气参数设计中涉及的技术指标见表 1，变压器匝比和初级励磁电感的计算公式分别为

$$N = \frac{V_{\text{omax}}(1-D_{\text{max}})}{V_{\text{imin}}D_{\text{max}}} \tag{1}$$

$$L_{\text{m}} \geqslant \frac{(V_{\text{imin}}D_{\text{max}})^2}{2P_{\text{o}}K_{\text{RF}}f_{\text{s}}}\eta \tag{2}$$

式中：K_{RF} 为纹波系数，取 0.5；η 为转换效率，取 0.9。在制作变压器时可通过开气隙来达到所需电感值，同时这一做法也可防止变压器磁饱和。

表 1 平面变压器设计技术指标

Tab. 1 Technical indicators for design of planar transformer

参数	数值
一次侧电压 V_{in}/V	20~60
二次侧电压 V_{omax}/V	311
输出功率 P_o/W	110
最大占空比 D_{max}	0.7
开关频率 f_s/kHz	57

在设计变压器的一、二次侧匝数时要避免磁心的磁通密度达到饱和，若匝数过多会增大绕组损耗，且对于 PCB 绕组走线也有一定难度，同时会要求采用磁心有较大的窗口面积，难以减小变压器体积，因此对于匝数的设计需要综合考虑。变压器一、二次侧匝数计算公式分别为

$$N_P = \frac{V_{imin} D_{max}}{f_s B_m A_e} \tag{3}$$

$$N_s = N N_P \tag{4}$$

式中：B_m 为最大工作磁通密度；A_e 为磁心有效截面积。

2.2 PCB 铜箔绕组结构设计

考虑到多层 PCB 板存在工艺限制，价格昂贵，且布板复杂。因此，在本设计中平面变压器的线圈采用多块 4 层 PCB 板相叠加，每块 PCB 板的结构相同，均为 PSSP 的结构，其中 P 表示一次侧，S 表示二次侧，这样可减少 PCB 板的层数，降低成本，使用较少数量的过孔，更加灵活地对不同层的走线进行排布。

根据初步选用的磁心型号与计算的绕组匝数，在确定好 PCB 板的层数后，应尽可能选取大的线宽，减小电阻损耗。线宽计算公式为

$$w_t = \frac{b_w - (n+1)s}{n} \tag{5}$$

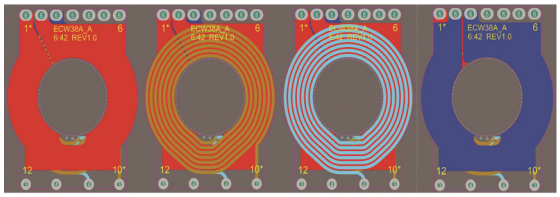
式中：b_w 为磁心窗口宽度；s 为线与线之间的距离，一般取 0.4 mm；n 为每层绕组中的匝数。

考虑到 PCB 绕组中铜箔电流密度对变压器温升的影响，在本设计中平面变压器 PCB 板中的铜箔厚度采用 2 oz(1 oz 约为 35 μm)制作。平面变压器设计结果参数见表 2，所设计的 4 层平面变压器 PCB 如图 5 所示。

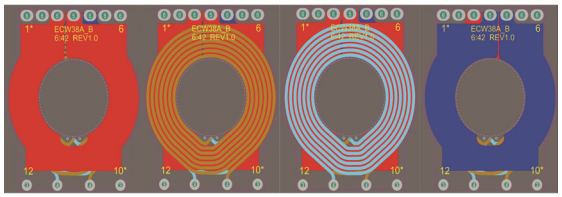
表 2 平面变压器设计结果参数

Tab. 2 Parameters of design results for planar transformer

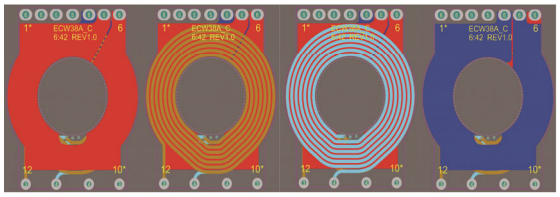
参数	数值/型号
励磁电感 L_m/μH	55
磁心类型	ECW38A
磁心材料	DMR95
PCB 板类型	4 层
PCB 板数目	3
一次侧匝数 N_P/ 二次侧匝数 N_s	6/42
一次侧线宽/二次侧线宽	>4.55/0.78



(a) PCB板一



(b) PCB板二



(c) PCB板三

图 5 平面变压器 PCB

Fig. 5 PCB of planar transformer

3 平面变压器电磁特性的仿真

3.1 设置边界条件

电磁场的边值问题由泛定方程与边界条件组成，对有限元的求解也就是对矩阵方程组的求解，而方程组的定解条件则是边界条件。将空气边界设为磁力线垂直条件，由于空气区域之外的磁场强度约为 0，因此对于空气外边界可应用磁通量平行边

界条件，即 $AY=0$，即认为外边界与空气区域边界磁力线平行，AY 为 Y 方向上的磁矢量势。本文中认为求解域外不存在磁场，因此可将狄利克雷边界条件施加在求解域边界上。

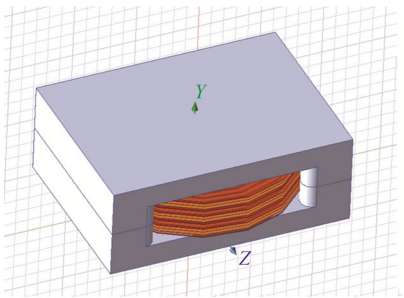
在设置边界条件时，当“创建区域”完成后，对于平面变压器仿真来说通常会选择填充所有方向及百分比偏移量来完成求解域的创建。理论上百分比的偏移量越大越好，因为求解域越大，求解精度越高，但是过大的求解域会占用计算资源及增加计算时间，并且对于精度的提升有限，故选择 200 的百分比偏移量来平衡计算时间及计算精度。

3.2　平面变压器电磁特性的仿真

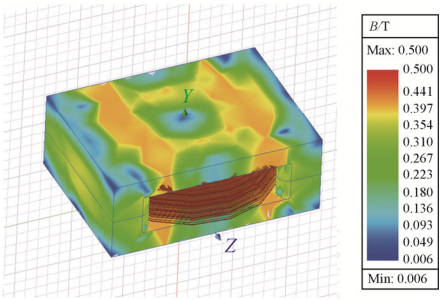
现通过 Ansys Maxwell 仿真软件建立平面变压器的 3D 模型，如图 6(a)所示，外侧为留有气隙的磁心，在磁心内分布有交叉排列的一、二次侧绕组。

将设计的平面变压器仿真模型导入 Maxwell 环境中进行有限元分析，采用频率为 57 kHz 的电流对变压器磁心模型进行了仿真，得到磁场强度和电流密度的分布，如图 6(b)和(c)所示。

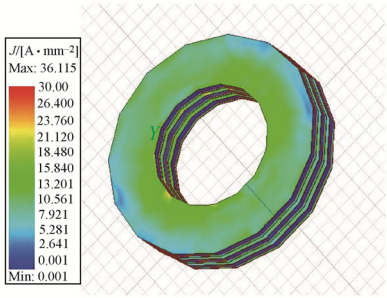
图 6(b)为平面变压器的磁心磁通密度分布图，由图可知，磁心中磁通密度最大的位置为磁柱的两侧，整体磁通密度为对称分布，在磁心的外围最小。通过该有限元仿真结果可知，磁心上磁通密度 B 的最大值为 0.397 T，最小值为 0.006 T，其密度不高于材料的磁密最大值 $B_{max}=0.530$ T，也即磁心未出现饱和情况，运行正常。电流密度在绕组上分布较为集中，由于层数的增加会导致中间层热功耗的增加，因此在布线时要注意散热问题。



(a) 平面变压器3D模型



(b) 磁心磁通密度分布图



(c) 绕组电流密度分布图

图 6　平面变压器仿真结果

Fig. 6 Simulation results of planartransformer

本文设计的反激电路工作在连续导通模式 CCM(continuous conduction mode)模式下，在 Maxwell 的 Simplorer 中搭建有源钳位反激电路模型，可得平面变压器的一次侧绕组电流 I_p 和二次侧绕组电流 I_s 的仿真波形，如图 7 所示。由图 7 可看出，I_p 和 I_s 均为梯形波，表明电路工作在 CCM 中，同时通过电流波形可看出开关频率为 57 kHz，从而证明了平面变压器设计的合理性。

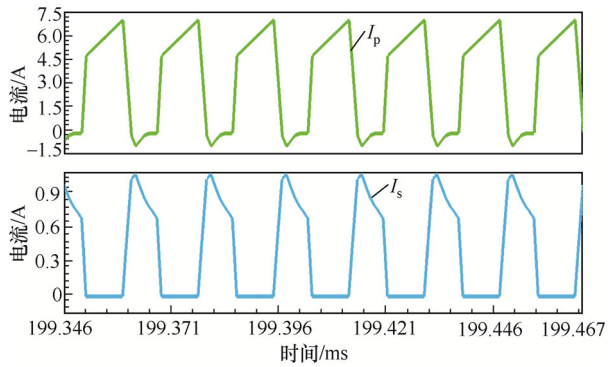


图 7　一、二次侧绕组电流波形

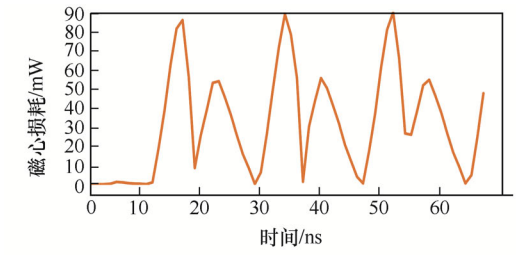
Fig. 7 Current waveforms of primary and secondary windings

3.3　平面变压器损耗分析

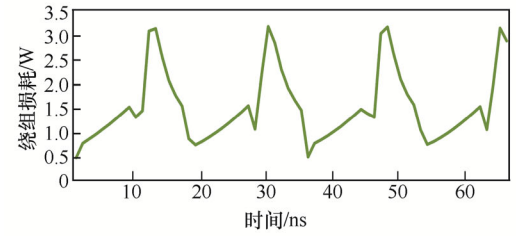
绕组损耗和磁心损耗为平面变压器的主要损耗，且损耗和电路拓扑的工作状态密切相关，根据

前述平面变压器设计完成的 3D 模型 1:1 建模，添加损耗计算需求及涡流效应需求。首先需要在 Simplorer 中搭建有源钳位反激电路来模拟器件的实际工作状况，其次导入 Maxwell 中设置好的模型到电路中进行联合仿真，确认变压器一、二次侧工作电压电流波形及负载电压电流波形是否符合设计预期，若符合，则可进一步获取软件自动计算所得的损耗仿真结果，从而可对其进行分析。

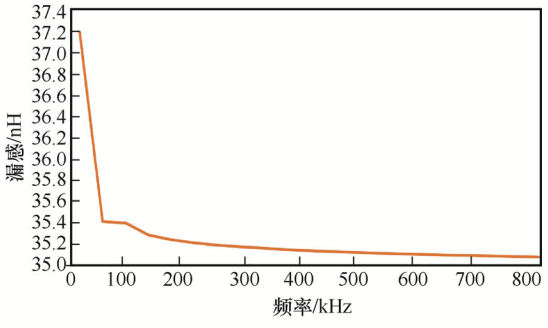
为了更准确地仿真出平面变压器的损耗，可使用 Maxwell 2D 瞬态场仿真，因为该仿真能够考虑到绕组的高频效应及磁心损耗，图 8(a)和(b)为变压器损耗的仿真波形。平面变压器的磁心损耗与绕组的排布方式无关，仅取决于磁心的磁通密度及变压器的工作频率，由仿真结果可看出磁心损耗最大值为 90 mW，绕组损耗最大值为 3.2 W。



(a) 磁心损耗仿真曲线



(b) 绕组损耗仿真曲线



(c) 变压器漏感仿真曲线

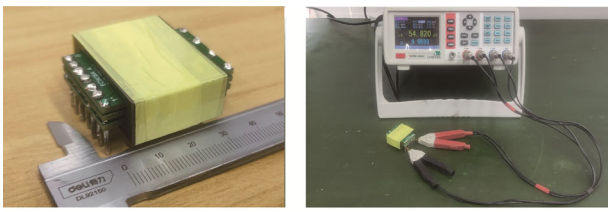
图 8 损耗及漏感仿真结果

Fig. 8 Simulation results of loss and leakage inductance

一次侧漏感仿真曲线如图 8(c)所示，在工作频率 57 kHz 下，平面变压器初级漏感为 35.42 nH，而且当工作频率大于 50 kHz 后，漏感的变化不明显。漏感为线圈间相互不交链的漏磁通所产生的电感，其与线圈尺寸、绕组排列等因素有关。由仿真结果可知，平面变压器所产生的漏感相较于传统高频变压器产生的漏感会小很多。

4 实验验证

本文将实验室已有的传统高频变压器和设计的平面变压器进行了比较，验证了采用平面变压器可提高微型逆变器的功率密度。图 9 为平面变压器的实物与实测变压器一次侧电感，传统高频变压器因骨架一般较大，采用的磁心高度较高，而平面变压器采用扁平结构的磁心，相较于传统高频变压器可省略骨架，使得变压器高度得到明显改善；其绕组采用 PCB 板，相较于传统的利兹线绕制稳定性较高，而且散热快。



(a) 平面变压器实物 (b) 变压器一次侧电感

图 9 变压器实物图与一次侧电感量

Fig. 9 Physical diagram of transformer, and primary inductance

传统绕线式高频变压器和平面变压器的尺寸信息见表 3，由表可知，虽然二者在长和宽方面没有较大差别，但平面变压器的高度只有传统高频变压器高度的 1/2，变压器体积明显减小，功率密度较高。

表 3 变压器尺寸对比

Tab. 3 Comparison ofdimensions between two transformers

变压器种类	高频变压器	平面变压器
长/mm	42	38
宽/mm	40	38
高/mm	31	15
体积/mm^3	52 080	21 660

基于以上的原理分析，本文设计了 1 台 220 W 的交错并联反激微型逆变器，其核心控制单元为 TI 公司型号为 TMS320F28035 的数字信号处理器 DSP(digital signal processor)，电路参数见表 4。

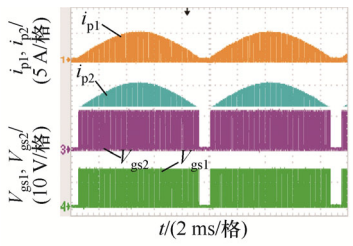
表 4　实验电路参数

Tab. 4 Parameters of experimental circuit

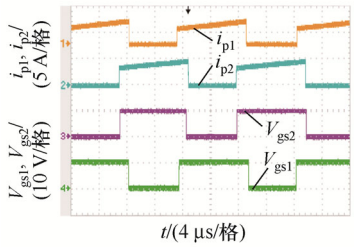
参数	数值/型号
输出功率 P_o/W	220
输入电压 V_{in}/V	20~60
额定电网电压 V_g/V	220 (50 Hz)
励磁电感 L_m/μH	55
开关频率 f_s/kHz	57
主、从开关管 S_{m1} 、S_{m2}	IRFS4321TRLPBF
钳位开关管 S_{a1} 、S_{a2}	SI7115DN-T1-GE3
整流二极管 D_1 、D_2	C4D02120
输出滤波电容 C_f/nF	330
输出滤波电感 L_f/μH	510

图 10(a)为微型逆变器一次侧电流与驱动信号的实验波形，其中 i_{p1} 、i_{p2} 分别为一次侧流过主变压器与从变压器的电流，V_{gs1} 、V_{gs2} 分别为主开关管与从开关管的驱动电压，放大细节如图 10(b)所示，可以看到，在半个工频周期内，一次侧电流呈正弦半波。

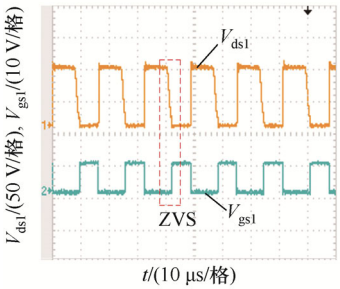
图 10(c)为微型逆变器主开关管的驱动电压 V_{gs1} 与漏源极电压 V_{ds1} 的实验波形。从实验波形可看出，



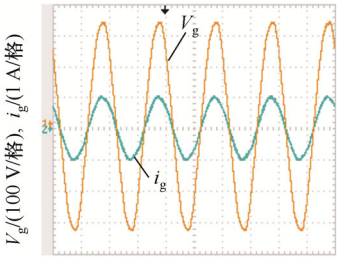
(a) 一次侧电流与驱动信号波形



(b) 电流与驱动信号放大波形



(c) 驱动信号与漏源极电压波形



(d) 电网电压与并网电流波形

图 10　实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms

在漏源极电压为 0 后，MOS 管使能，主开关管实现 ZVS，能够降低开关损耗，提高效率。由图 10(c)可知，开关管在关断时漏源极电压未产生较高尖峰，漏感能量被有效吸收，降低了开关管两端的电压应力。

电网电压和并网电流的实验波形如图 10(d)所示。由图 10(d)可看出并网电流曲线的正弦度效果较好，可以实现单位功率并网。

在仿真软件中搭建仿真模型并对并网电流波形进行快速傅里叶变换分析得到并网电流谐波含量如图 11 所示，并网电流的 THD 仿真结果为 2.36%，符合并网谐波含量低于 5%的标准，满足并网要求。

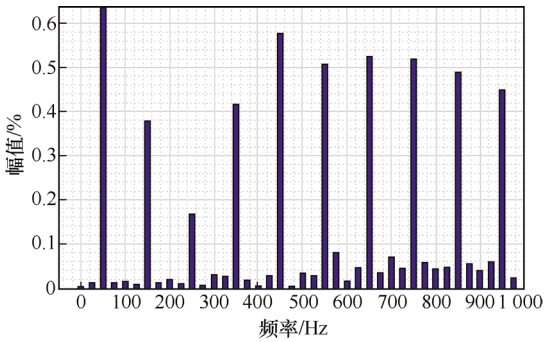


图 11　并网电流谐波含量

Fig. 11 Harmonic content of grid-connected current

在不同负载下对光伏微逆的效率进行测试，可

得效率曲线如图 12 所示，可看出光伏微逆在整个负载范围内均达到较高效率。

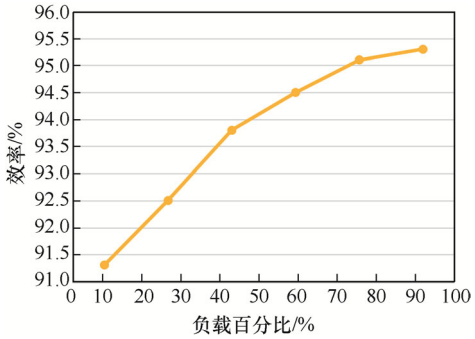


图 12 效率曲线

Fig. 12 Efficiency curve

5 结语

本文通过对平面变压器的电气参数和绕组结构进行设计，搭建了 1 台 220 W 的交错并联反激微型逆变器样机进行实验测试。实验结果表明，采用表面积大、热特性好的平面变压器，可有效提高微型逆变器功率密度，减小变压器漏感，并改善户外高温环境下传统高频变压器的温升问题；同时，采用低端有源钳位电路可提高效率，吸收漏感能量，并实现 ZVS。

参考文献：

[1] 汪飞, 冯夏云, 吴春华, 等. 多反激式微型逆变器并网谐波交互研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 709-716.
Wang Fei, Feng Xiayun, Wu Chunhua, et al. Research on grid harmonic interaction of multiple flyback micro-inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 709-716. (in Chinese)

[2] 吴春华, 易苑, 李智华, 等. 考虑参数权重与分层映射的光伏组件健康程度检测[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4856-4867.
Wu Chunhua, Yi Yuan, Li Zhihua, et al. Health detection of photovoltaic modules considering parameter weights and hierarchical mapping [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4856-4867. (in Chinese)

[3] Qin Ling, Hu Mao, Lu D D, et al. Buck-Boost dual-leg-integrated step-up inverter with low THD and single variable control for single-phase high-frequency AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6278-6291.

[4] 李庆军, 邰建豪, 范越, 等. 多微型逆变器微电网频率暂态稳定综合控制研究[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 57-65.
Li Qingjun, Tai Jianhao, Fan Yue, et al. Study on integrated control of frequency transient stability of multi-microinverter microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 57-65. (in Chinese)

[5] 汪飞, 徐新蔚, 吴春华. 光伏微型逆变器拓扑结构研究与分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 24-33.
Wang Fei, Xu Xinwei, Wu Chunhua. Research and analysis of photovoltaic micro-inverter topology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 24-33. (in Chinese)

[6] Ali Rezaei M, Lee K J, Huang A Q. A high-efficiency flyback micro-inverter with a new adaptive snubber for photovoltaic applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 318-327.

[7] 刘树林, 沈一君, 刘旭, 等. 正-反激变换拓扑的功率传输分配特性及设计考虑[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 5006-5016.
Liu Shulin, Shen Yijun, Liu Xu, et al. Power transmission distribution characteristics and design considerations of forward-flyback conversion topology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 5006-5016. (in Chinese)

[8] Paul A R, Bhattacharya A, Chatterjee K. A single-phase grid-connected Boost/Buck-Boost-derived solar PV micro-inverter topology having power decoupling capability [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(2): 2340-2349.

[9] Dong Dong, Agamy M S, Harfman-Todorovic M, et al. A PV residential microinverter with grid-support function: Design, implementation, and field testing [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 469-481.

[10] 赵坚, 汪海宁, 张晓安. 单端反激有源钳位光伏并网微逆变器设计[J]. 电气工程学报, 2016, 11(4): 22-28.
Zhao Jian, Wang Haining, Zhang Xiaoan. Design of active clamp grid-connected micro-inverter based on single-

ended flyback topology [J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(4): 22-28. (in Chinese)

[11] Xue Lingxiao, Zhang J. Highly efficient secondary-resonant active clamp flyback converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1235-1243.

[12] 叶怡伟, 陈敏, 徐德鸿. 软开关有源钳位逆变器逐波限流控制策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 43-50.
Ye Yiwei, Chen Min, Xu Dehong. Research on cycle-by-cycle current limit strategies for active-clamped soft-switching inverters [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 43-50. (in Chinese)

[13] Kumar P M. Design and implementation of photovoltaic inverter system using multi-cell interleaved fly-back topology [J]. International Journal of ChemTech Research, 2021, 10(14):300-308.

[14] 沈孟锋, 羊荣金, 张学良, 等. 一种高频变压器多级式拓扑的微型逆变器设计[J]. 电源技术, 2021, 45(2): 259-262.
Shen Mengfeng, Yang Rongjin, Zhang Xueliang, et al. Design of micro inverter with multi-stage topology of high frequency transformer [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(2): 259-262. (in Chinese)



朱一昕

作者简介：

朱一昕(1987—)，男，博士，副教授。研究方向：电力电子技术及其应用。E-mail：yixinzhu1987@jiangnan.edu.cn。

侯大成(1999—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：电力电子技术及其应用。E-mail：6211925008@stu.jiangnan.edu.cn。

刘淳铭(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子技术及其应用。E-mail：6211925012@stu.jiangnan.edu.cn。

许德智(1985—)，男，博士，教授。研究方向：电气系统故障诊断与容错控制。E-mail：xudezhi@jiangnan.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)