

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.243

中图分类号: TM464

文献标志码: A

基于交错多地层结构的平面磁集成 LCL-EMI 滤波器设计与实现

叶 鑫¹, 陆子健¹, 刘艺涛²(中国电源学会高级会员)

(1.深圳大学机电与控制工程学院, 深圳 518000; 2.深圳大学广东省电磁控制
与智能机器人重点实验室, 深圳 518000)

摘要: 谐波和电磁干扰 EMI(electromagnetic interference)滤波器是并网逆变器中用于抑制谐波失真和 EMI 噪声的 2 个重要输出滤波器。因此, 提出 1 种通过平面磁集成的方法组合谐波和 EMI 滤波器, 实现设备体积和质量的减小。首先, 选择合适的磁芯将共模电感和差模电感通过 PCB 绘制平面线圈的方法集成在同一磁芯上, 在 PCB 板层插入电介质板, 合理规划层连接方式集成分立电容, 实现 EMI 滤波器的平面电磁集成; 其次, 采用对称 LCL 滤波器拓扑结构, 取代传统的磁集成非对称结构, 进一步通过设计磁芯中柱的气隙和合理布置平面绕组, 将 LCL 谐波滤波器的电感也集成在同一磁芯单元, 形成 LCL-EMI 型平面磁集成滤波器; 最后, 通过搭建氮化镓单相逆变器平台, 对平面磁集成的 LCL-EMI 滤波器进行实验分析, 验证所提平面磁集成方法的可行性。

关键词: 逆变器; 平面磁集成; LCL 滤波器; EMI 滤波器

Design and Implementation of Planar Magnetic Integrated LCL-EMI Filter Based on Interleaved Multi-GND-layer Structure

YE Xin¹, LU Zijian¹, LIU Yitao², *Senior Member, CPSS*

(1. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Electromagnetic Control and Intelligent Robots, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Harmonic and electromagnetic interference (EMI) filters are two important output filters used to suppress the harmonic distortion and EMI noise in grid-connected inverters. Harmonic and EMI filters are combined by planar magnetic integration to reduce the volume and weight. Through the selection of an appropriate magnetic core, the common mode and differential mode inductors are integrated into the same core by drawing PCB planar coil. To integrate the discrete capacitors and further realize the planar magnetic integration of EMI filter, the dielectric is inserted into the PCB and the layer connection mode is reasonably planned. A symmetric LCL filter is used to replace the traditional asymmetric structure of magnetic integration. Furthermore, by designing the air gap in the center pillar of the magnetic core and reasonably arranging the planar windings, the inductors of LCL harmonic filter are also integrated into the same magnetic core unit to form an LCL-EMI planar magnetic integrated filter. A gallium nitride single-phase inverter platform was built, and the LCL-EMI filter with planar magnetic integration was experimentally analyzed to verify the feasibility of the planar magnetic integration method.

Keywords: Inverter; planar magnetic integration; LCL filter; electromagnetic interference (EMI) filter

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2022-06-17, 2022-07-11;

录用日期: 2022-07-13; 网络首发日期: 2022-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52007122)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52007122

并网逆变器中的 LCL 滤波器和 EMI 滤波器由电感和电容等无源器件组成。无源滤波器中磁性元件的体积通常较大, 而高频化和集成化是电力电子装置的发展趋势。磁集成技术将多个实现不同功能

的磁性元件绕组集成在同一磁芯结构上,有利于提高系统的功率磁密度^[1-3]。文献[4]提出 1 种单相和三相逆变器的 LCL 滤波器磁集成设计,使滤波器 2 个电感产生的大部分基波磁通在公共磁芯抵消;文献[5]在传统 LCL 磁集成滤波器 EE 型磁芯的中柱上引入耦合绕组,在相同的磁芯数量前提下实现了更好的滤波效果;文献[6]提出在 EIE 磁芯中的 I 型磁芯上串联 1 个去耦绕组,使其并联电容,从而实现更好的谐波抑制效果。

在 EMI 滤波器磁集成方法上,文献[7-8]采用多级高度集成的平面电磁干扰滤波器设计,通过增加插入损耗曲线斜率及改变环线绕组的方式,大大减小了滤波器体积。利用 PCB 的覆铜作为电感绕组,实现多个电感的集成,可以大大减小电磁干扰滤波器的体积,但存在分布式的耦合电感^[9-10]。文献[11-12]使用柔性铜箔代替传统的铜线绕组,在铜箔之间加入电介质层形成电容,进一步减小变换器的整体体积,在中小功率变换器领域具有较大的应用前景。

综上所述,本文首先采用对称拆分的电感结构,旨在抑制共模干扰向差模干扰的转化,提高 LCL 滤波器对电磁干扰的抑制性能。其次,结合交错多地层的平面结构,设计了 LCL-EMI 滤波器的平面磁集成结构,将滤波器所需电感集成在同一磁芯上,实现分立电容的集成,使其具备更小的体积、质量和更低的功率损耗。最后,通过仿真和基于氮化镓单相逆变器的实验平台,验证采用交错多层结构的 LCL-EMI 滤波器的谐波抑制和电磁干扰抑制效果。

1 LCL-EMI 滤波器的平面磁集成结构与分析

1.1 LCL-EMI 滤波器的结构分析

本文在 LCL 滤波器的结构上,将每个电感拆分为 2 个电感,对称分布在 L 线和 N 线上,如图 1(a)所示。图 1(b)和(c)为共模激励下 2 种结构的等效模型,其中 V_1 、 V_2 和 V_1^* 、 V_2^* 分别为共模噪

声在线路阻抗稳定网络 LISN(line impedance stabilization network)上产生的共模噪声电压。当 $V_1=V_2$ 时,可抑制共模噪声向差模噪声转换,因此对称拆分结构能够抑制共模干扰向差模干扰转换。结合图 1(a)的对称拆分结构和 EMI 滤波器拓扑结构,可以得到如图 2 所示的 LCL-EMI 滤波器。由于差模电感可由共模电感的漏感代替,因此对称结构能够对差模干扰产生一定的抑制作用,不需单独的差模电感就减小了滤波器体积。

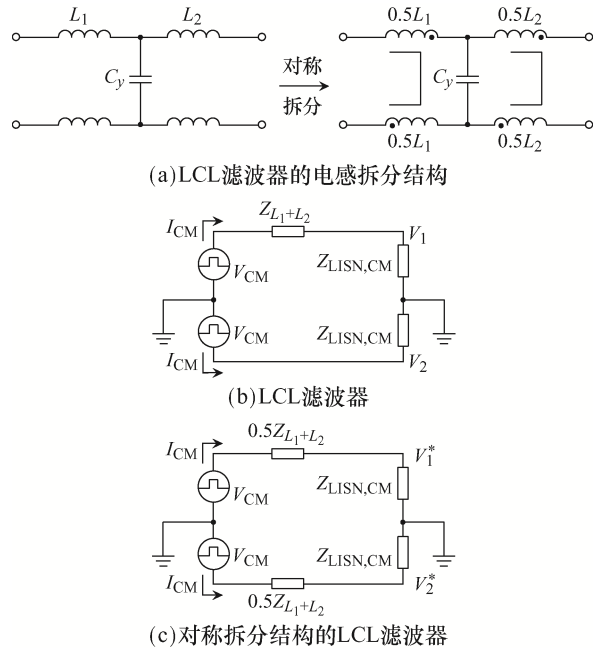


图 1 共模激励下 2 种滤波器的等效模型
Fig. 1 Equivalent models of two filters under CM excitation

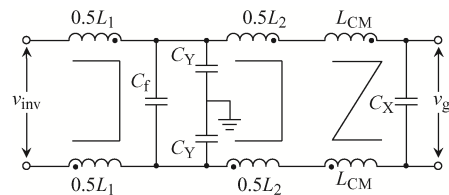


图 2 LCL-EMI 滤波器拓扑结构
Fig. 2 Topology of LCL-EMI filter

1.2 平面磁集成 LCL-EMI 滤波器交错多地层结构
共模电感采用图 3(a)的结构,在 2 层绕组间插入绝缘层以增大相对距离 d ,减小寄生电容,可表示为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l w}{d} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为介质的相对介电常数; ϵ_r 为真空介电常数; d 为 2 层绕组间的距离; S 为 2 层绕组间的相对面积, 即绕组等效长度 l 与绕组宽度 w 的乘积。

图 3(b)中的结构将 1 个地层均分为 2 层, 分别与 2 层绕组通过介质形成共模电容, 串联后的共模电容容值不变。

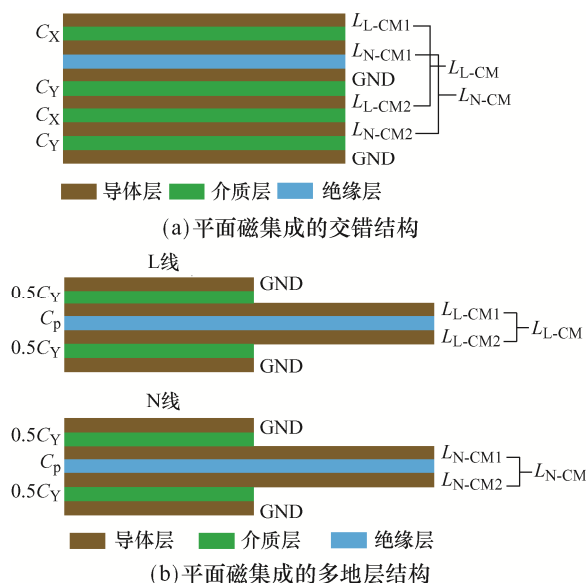


图 3 平面磁集成结构

Fig. 3 Structures of planar magnetic integration

LCL-EMI 滤波器平面磁集成的绕组结构如图 4 所示。图 4(a)为对称拆分结构LCL滤波器的绕组分布, L 线和 N 线各分布有 $0.5L_1$ 和 $0.5L_2$, 每个拆分后的电感均有 2 层绕组, 并在中间添加绝缘介质。其中 1 层绕组与地层之间插入陶瓷介质形成共模电容 C_Y , 最后在 L 线或 N 线的拆分电感绕组间插入绝缘介质以减小相互影响。EMI 滤波器电感绕组较少, 采用如图 4(b)所示的基本结构作为 EMI 滤波器电感绕组, 添加额外的绕组层和介质层作为共模电容 C_X 。由于需要对谐波电容电流采样进行有源阻尼控制, 因此谐波电容采用外接的分立电容。

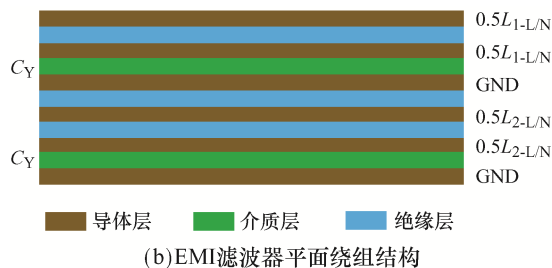
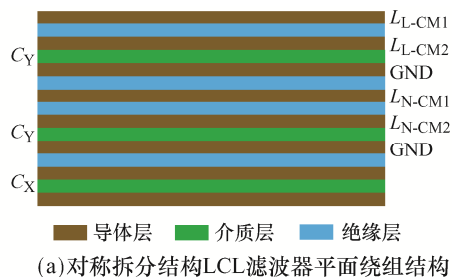


图 4 LCL-EMI 滤波器的平面绕组结构

Fig. 4 Planar winding structure of LCL-EMI filter

1.3 LCL-EMI 滤波器的平面磁集成结构与分析

结合 LCL-EMI 滤波器的拓扑结构和平面绕组结构, 设计得到的磁集成结构如图 5 所示。其中, 磁芯的 2 个边柱作为共模电感绕组, L 线和 N 线上各为 N_1 匝, 中柱作为拆分电感的绕组, 谐波电感 L_1 和 L_2 的拆分电感匝数分别为 N_2 和 N_3 。通过调节合适的气隙长度 l_{gap} , 防止磁芯饱和, 同时调节左右磁柱的耦合程度。

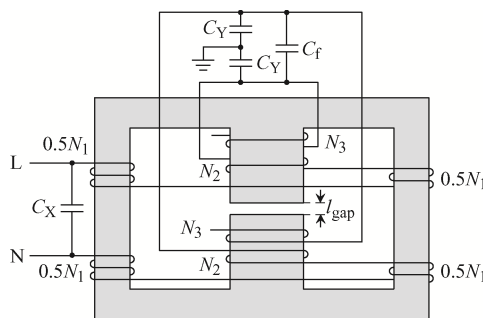
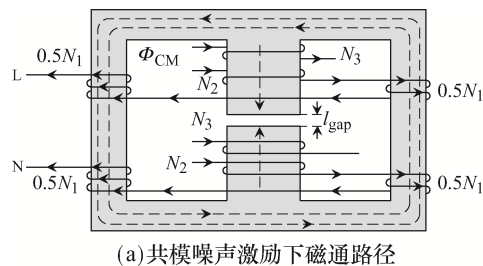


图 5 LCL-EMI 滤波器的磁集成结构

Fig. 5 Magnetic integrated structure of LCL-EMI filter

共模噪声激励产生的磁通路径如图 6(a)所示, 中柱绕组产生的磁通 Φ_{DM} 方向相反, 互相抵消, 呈现低阻抗, 对共模噪声几乎无作用; 左右边柱绕组产生的磁通 Φ_{CM} 方向相同, 互相增强, 呈现高阻抗, 整个结构表现为共模电感。

差模噪声激励产生的磁通路径如图 6(b)所示, 2 个边柱绕组产生的磁通 Φ_{DM} 方向相反, 因此呈现



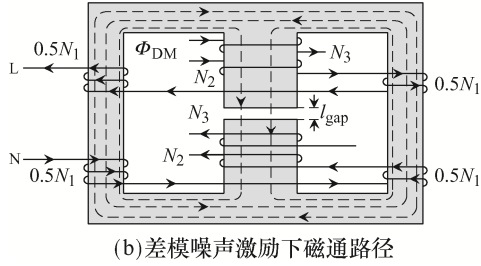


图 6 共差模噪声激励下的磁通路径

Fig. 6 Magnetic flux path excited by CM and DM noises

低阻抗;中柱绕组产生的磁通方向相同,相互加强,呈现高阻抗。此时对称拆分电感实现差模电感,对差模噪声起到抑制作用。

2 LCL-EMI 滤波器的平面磁集成设计

选择 PC95 材质的锰锌铁氧体磁芯,产品型号为 PEE58/11/28, 25 °C 的初始磁导率为 3 300±25%。在共模噪声激励下,对图 6(a)所示结构的磁通路径进行分析,得到如图 7(a)所示的磁通路径模型,其中 R_s 、 R_y 、 R_c 和 R_{gap} 分别代表所选磁芯边柱、磁轭、中柱和气隙的磁阻。当单边柱的磁势作用时,等效简化的磁通路径如图 7(b)所示,其中 Φ 为左磁柱绕组产生的总磁通, Φ_1 和 Φ_2 分别为流经右磁柱和中柱的磁通分量。单个电感线圈的自感磁阻 $R_{s,CM}$ 和 2 个电感的互感磁阻 $R_{m,CM}$ 可分别表示为

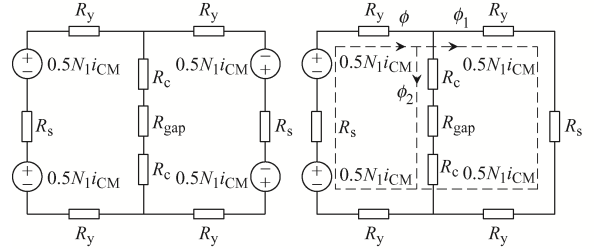
$$\begin{cases} R_{s,CM} = \frac{F}{\Phi} = R_1 + R_1 \parallel R_2 \\ R_{m,CM} = \frac{F}{\Phi_1} = \frac{F}{\Phi R_2 / (R_1 + R_2)} = \frac{R_1(R_1 + 2R_2)}{R_2} \\ R_{gap} = \frac{l_{gap}}{\mu_0 A_c} \\ R_1 = R_s + 2R_y \\ R_2 = R_{gap} + 2R_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: F 为总磁动势; μ_0 为真空磁导率; A_c 为气隙磁通路径的横截面积。

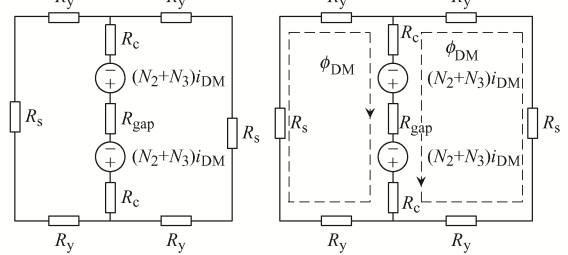
电感匝数 N_1 的计算公式为

$$\begin{cases} L_{CM} = (2 + 2K_{m,CM}) \frac{N_1^2}{R_{s,CM}} = \frac{2N_1^2}{R_1} \\ K_{m,CM} = \frac{R_{s,CM}}{R_{m,CM}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $K_{m,CM}$ 为耦合系数。



(a) 共模激励下的磁通路径 (b) 共模激励下的等效简化磁通路径



(c) 差模激励下的磁通路径 (d) 差模激励下的等效简化磁通路径

图 7 噪声激励下 LCL-EMI 滤波器的磁通路径分析

Fig. 7 Magnetic circuit analysis of LCL-EMI filter excited by noise

在差模噪声激励下,对图 6(b)的结构磁通路径进行分析,得到如图 7(c)所示的磁路模型,磁通路径如图 7(d)所示。在 L 线和 N 线上的拆分电感间存在耦合,忽略漏感前提下的耦合系数为 1。拆分谐波电感的匝数 N_2 和 N_3 的计算公式为

$$\begin{cases} L_1^* = \frac{L_1}{2} = \frac{2(N_3^2 + N_3 N_2)}{R_{s,DM}} \\ L_2^* = \frac{L_2}{2} = \frac{2(N_2^2 + N_2 N_3)}{R_{s,DM}} \\ R_{s,DM} = R_1 \parallel R_1 + R_2 = 0.5R_1 + R_2 \end{cases} \quad (4)$$

根据搭建的实验平台参数,通过计算得到的 LCL-EMI 滤波器的元件参数见表 1。结合滤波器的参数,设计磁芯的结构和物理参数。磁芯中柱的气隙长度决定了左右磁柱共模电感绕组的耦合程度。为了平衡共模电感绕组匝数与 LCL 滤波器的电感匝数,选择耦合系数 $K_{m,CM}=0.95$,并根据气隙长度与耦合系统的关系,选择气隙长度 $l_{gap}=0.62$ mm。将气隙长度与共模电感 $L_{CM}=7.8$ mH 代入式(3),得到 N_1 和气隙长度的关系,取 $N_1=6$ 。同理,将谐波电感 $L_1=4$ mH 和 $L_2=200$ μ H 代入式(4),计算得到 $N_2=6$, $N_3=8$ 。

表 1 LCL-EMI 滤波器参数
Tab. 1 Parameters of LCL-EMI filter

滤波器	参数	数值
LCL 滤波器	L_1/mH	4
	$L_2/\mu\text{H}$	200
	$C_f/\mu\text{F}$	3
EMI 滤波器	L_{CM}/mH	7.80
	$L_{DM}/\mu\text{H}$	0.47
	C_Y/nF	3.3

3 仿真和实验验证

通过 PLECS 电力电子仿真软件对 LCL-EMI 滤波器结构进行验证, 以搭建的氮化镓单相逆变器为实验平台。逆变器侧的输出电流波形如图 8(a) 所示, 各频率处的谐波幅值如图 8(b) 所示, 此时的 THD=7.45%, 不能满足并网逆变器谐波失真标准。接入滤波器后, 网侧输出电流如图 8(c) 所示, 得到的各次谐波频谱如图 8(d) 所示, 此时 THD=1.26%, 满足标准。

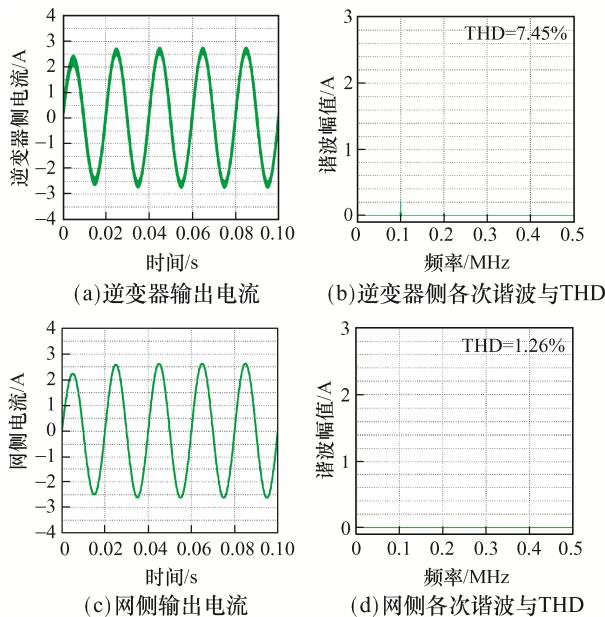


图 8 接入 LCL-EMI 滤波器磁集成结构后输出电流与谐波
Fig. 8 Output current and harmonic after connected to magnetic integrated structure of LCL-EMI filter

为了验证磁芯在工作条件下是否会发生磁饱和, 在 ANSYS Maxwell 软件中对绕组结构进行有限元仿真。PWM 控制的逆变器输出电流谐波主

要集中在频率为开关倍数的整数倍频率, 当开关频率较高时, 必须考虑是否会导致磁芯饱和。通过在 PLECS 仿真中得到倍频处的谐波电流幅值, 可以得到谐波电感 L_1 在谐波电流激励下的磁通分布, 如图 9 所示。可以看出, 各频率的谐波激励产生的磁通均小于所选磁芯的饱和磁通密度 $B_m=530 \text{ mT}$, 不足以令本文选用的磁芯饱和。

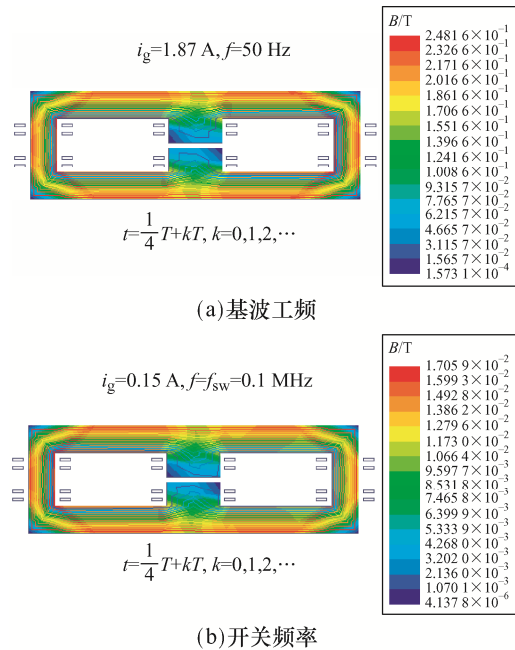


图 9 谐波电感 L_1 在不同频率谐波激励下的磁通分布
Fig. 9 Magnetic flux distribution of harmonic inductor L_1 under harmonic excitation of different frequencies

对本文所设计 LCL-EMI 滤波器的平面磁集成结构进行实验验证, 滤波器物理参数见表 2。根据上文分析, 得到分立式 LCL 谐波滤波器、分立式 EMI 滤波器和平面磁集成 LCL-EMI 滤波器, 分别如图 10(a)、(b)和(c)所示, 3 种结构的体积与质量对比如图 11(a)和(b)所示。可见, LCL-EMI 集成结构相比于分立结构, 体积减少了 48.9%, 质量减少了 93%, 证明了本文所设计的平面磁集成结构更有利于减小逆变器的体积和质量。

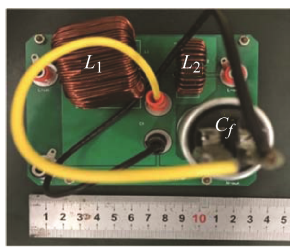
为了验证 LCL-EMI 滤波器的谐波抑制效果, 实验得到逆变器输出电流 i_{inv} 、网侧输出电流 i_g 和网侧输出电压 v_g 的波形, 如图 12 所示。可见: 与仿真分析相同, 逆变器侧电流 THD=8.46%, 不满

足并网谐波标准；经过 LCL-EMI 滤波器后，网侧电流 THD=1.28%，谐波得到了明显抑制，符合所需并网谐波标准，验证了本文所设计平面磁集成 LCL-EMI 滤波器的谐波抑制效果。

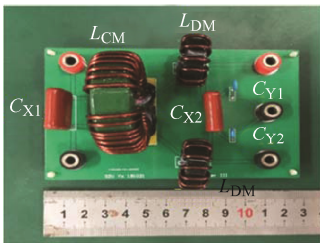
表 2 LCL-EMI 滤波器物理参数

Tab. 2 Physical parameters of LCL-EMI filter

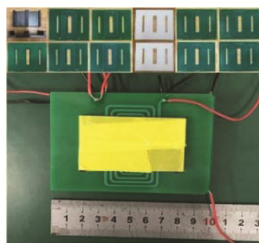
器件类型	参数	数值	备注
逆变器侧 拆分电感 $0.5L_1$	线圈层数	2	
	每层匝数	4	
网侧拆分 电感 $0.5L_2$	线圈层数	2	
	每层匝数	3	
共模电感 L_{CM}	线圈层数	2	
	每层匝数	3	
共模电容 C_Y	介质厚度/mm	0.2	氧化铝陶瓷片
	介质相对介电常数	30	
差模电容 C_X	介质厚度/mm	0.4	氧化铝陶瓷片
	介质相对介电常数	30	
电感线圈	厚度/mm	0.5	
	宽度/mm	2	
	间距/mm	0.6	
绝缘层	介质厚度/mm	1	FR-4 材料
地层	铜层厚度/mm	0.5	面积与共模绕组相同



(a)分立式LCL滤波器



(b)分立式EMI滤波器



(c)LCL-EMI滤波器

图 10 3 种滤波器对比

Fig. 10 Comparison among three kinds of filter

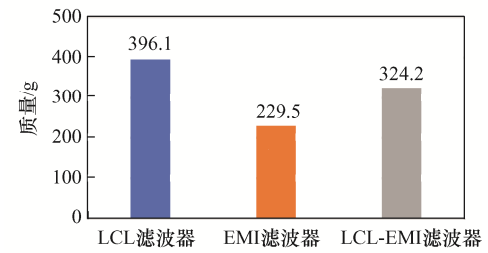
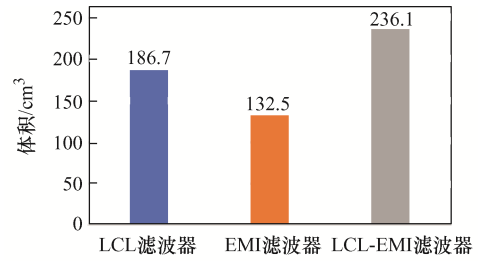
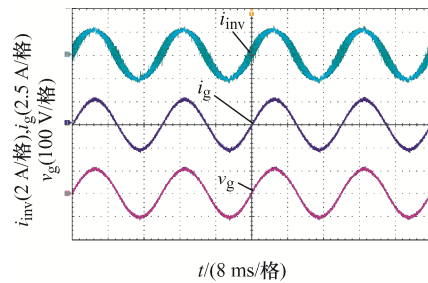
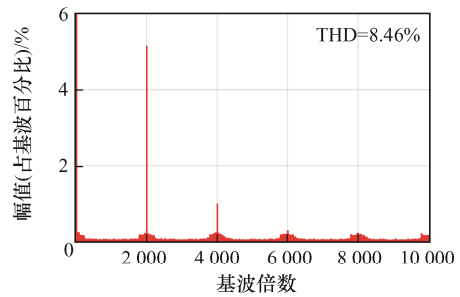


图 11 滤波器体积和质量对比

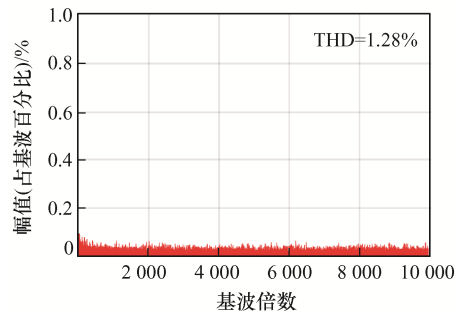
Fig. 11 Comparison of volume and weight among different filters



(a)逆变器侧电流、网侧电流与电压



(b)逆变器侧输出电流频谱



(c)网侧输出电流频谱

图 12 逆变器输出电压、电流波形

Fig. 12 Waveforms of output voltage and current of inverter

为了验证滤波器的电磁干扰抑制效果, 实验得到的插入损耗如图 13 所示。可以看出, 滤波器在 10 MHz 内均有较高的插入损耗。虽未设计独立的差模电感, 但在拆分结构的谐波电感及共模电感的作用下, 插入损耗最高仍可达 -73 dB。共模电感虽受到寄生参数的影响, 但在整个频段上插入损耗较高, 最高可达 -68 dB, 滤波器的插入损耗能够满足需求。

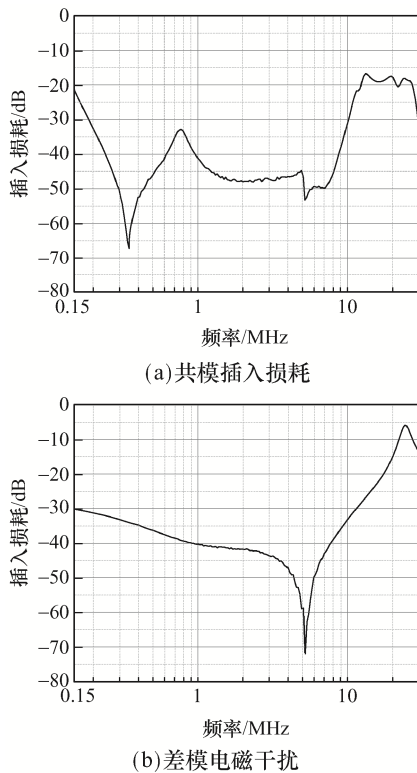


图 13 LCL-EMI 平面磁集成滤波器的插入损耗
Fig. 13 Insertion loss of planar magnetic integrated LCL-EMI filter

将平面磁集成的 LCL-EMI 滤波器接入逆变器后, 测量得到共模和差模传导电磁干扰分别如图 14(a)和(b)所示, 整体上均满足欧洲电工标准委员会关于电磁兼容性的标准 EN 55022。其中, 共模滤波器在低频段抑制效果较好, 在高频段有所减弱, 但仍能满足需求; 差模滤波器在中频段抑制效果较好, 虽然高频段插入损耗较低, 但是高频段的差模噪声较小, 也足以满足需求, 验证了本文设计滤波器对传导电磁干扰的抑制能力。

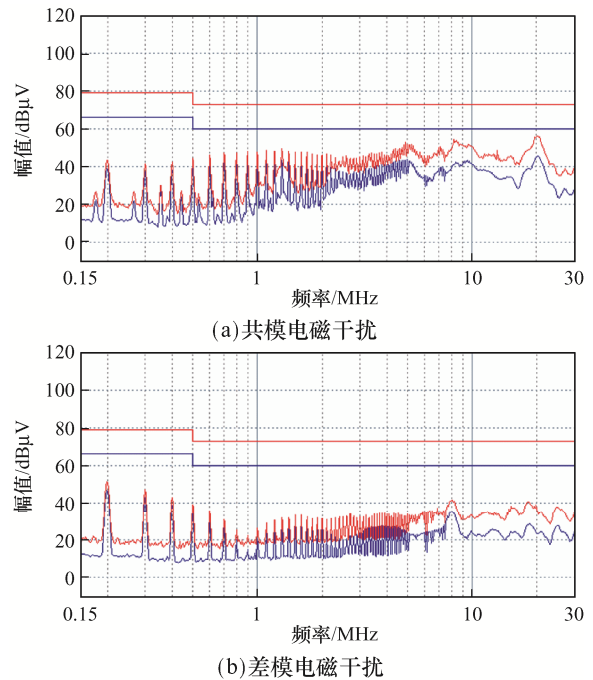


图 14 接入平面磁集成 LCL-EMI 滤波器后的传导电磁干扰

Fig. 14 Conducted electromagnetic interference after connected to planar magnetic integrated LCL-EMI filter

4 结语

本文针对单相逆变器的谐波问题, 对 LCL 型谐波滤波器的结构与性能进行分析。首先, 为了改善 LCL 滤波器对电磁干扰的抑制性能, 采用对称拆分结构的 LCL 电感, 抑制了共模干扰向差模干扰的转化, 同时便于与 EMI 滤波器的磁集成。然后, 结合交错结构平面绕组和多层平面绕组的优点, 设计了交错多层平面绕组结构及 LCL-EMI 滤波器的平面磁集成结构。最后, 通过仿真和实验验证了本文所设计结构的谐波抑制效果和电磁干扰效果, 相较于分立式的 LCL 滤波器和 EMI 滤波器, 本文设计的平面磁集成 LCL-EMI 滤波器具有更小的体积和质量, 功率损耗也更低。

参考文献:

[1] 阮新波. LCL 型并网逆变器的控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

- Ruan Xinbo. Control Techniques for LCL-Type Grid-Connected Inverters [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [2] Liu Yitao, Jiang Shiqi, Liang Weihua, et al. Modeling and design of the magnetic integration of single- and multi-stage EMI filters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 276-288.
- [3] 姚宏旭, 海航, 高妍, 等. 新型级联型磁集成开关电感高增益 Boost 变换器[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 111-120. Yao Hongxu, Hai Hang, Gao Yan, et al. Novel cascaded magnetically integrated switching inductor high-gain Boost converter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 111-120. (in Chinese)
- [4] Pan Donghua, Ruan Xinbo, Bao Chenlei, et al. Magnetic integration of the LCL filter in grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1573-1578.
- [5] Li Xiaoqiang, Lin Pengfeng, Tang Yi. Magnetic integration of LTL filter with two LC-traps for grid-connected power converters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1434-1446.
- [6] Li Xiaoqiang, Fang Jingyang, Lin Pengfeng, et al. Active magnetic decoupling for improving the performance of integrated LCL-filters in grid-connected converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1367-1376.
- [7] Wang Shishan, Xu Chenchen. Extraction of magnetic parameters for elements of a planar EMI filter [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(2): 360-366.
- [8] 宋峥, 王世山. EMI 滤波器网络最佳工作状态设计及其平面化实现[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 179-187.
- Song Zheng, Wang Shishan. The design of the optimized running state of EMI filter network and its planar realization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 179-187. (in Chinese)
- [9] Ali M, Labouré E, Costa F. Integrated active filter for differential-mode noise suppression [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1053-1057.
- [10] Biela J, Wirthmueller A, Waespe R, et al. Passive and active hybrid integrated EMI filters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1340-1349.
- [11] Deng Cheng, Li Shuang, Tang Jie. A review of flexible multilayer foil integration technology for passive components [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 13025-13038.
- [12] 陈谦, 胡长生, 邓成, 等. 基于柔性多层带材 3 kW 全集成 EMI 滤波器[J]. 电源学报, 2012, 10(2): 76-83. Chen Qian, Hu Changsheng, Deng Cheng, et al. 3 kW completely-integrated EMI filter based on flexible multilayer foil [J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(2): 76-83. (in Chinese)

作者简介:



叶鑫

叶鑫(1996—), 男, 硕士。研究方向: 高频电力电子变换器建模及磁集成。E-mail: 747745189@qq.com。

陆子健(1997—), 男, 本科。研究方向: 电力电子变换器电磁兼容及磁集成。E-mail: 2016110091@email.szu.edu.cn。

刘艺涛(1986—), 男, 中国电源学会高级会员, 通信作者, 博士, 副教授。研究方向: 并网逆变器控制及电磁兼容。E-mail: liuyt@szu.edu.cn。

(责任编辑: 郭凯凯)