

# 关键物理结构对逆变器叠层母排寄生电感的影响

於少林, 张 兴, 王佳宁

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

**摘 要:** 该文系统化地研究关键物理结构对叠层母排电感的影响, 主体包括母排的三维物理尺寸、安装孔和端子。通过三维有限元法电磁仿真, 全方位分析上述关键因素对电感的影响, 并在研究中探讨内在的电磁机理, 凝练出寄生电感与关键结构的简单数学关系, 并对现有的一些结论进行修正。同时提出对母排电感影响的核心因素, 并提出优化设计方案。

**关键词:** 叠层母排; 逆变器; 寄生电感; 三维有限元分析; 电磁机理

**中图分类号:** TM46

**文献标识码:** A

## 0 引 言

在逆变器系统中, 母排的电感量直接影响开关器件的使用效果, 如果母排电感过高, 产生的尖峰电压会损坏元器件, 也会引起直流电容器的电流不平衡分布等问题<sup>[1-3]</sup>。相比于传统的分立母排, 图 1a 所示的叠层母排具有低电感、低阻抗等优势。因此被广泛应用在大功率电力电子设备中, 如光伏逆变器、电机驱动、UPS 系统等<sup>[3-5]</sup>。

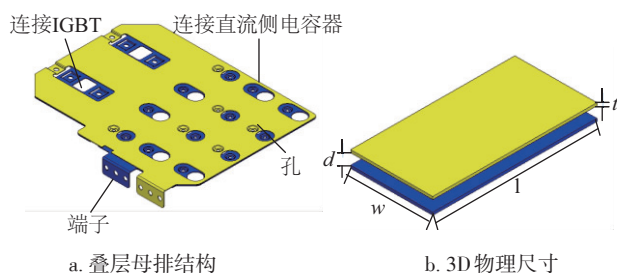


图1 叠层母排

Fig. 1 Laminated bus bar

国内外学者对母排已有相关研究<sup>[6-10]</sup>, 文献[6]以图 1b 为母排简化模型分析其电感, 但对外电感和内电感的解释具有误导性, 甚至得出错误结论。此外, 文献[9]给出一定尺寸范围内计算母排总电感的经典解析公式, 而现有的一些母排产品尺寸并不满足公式给出的前提条件。在较早的一些文献中也提及安装孔(简称孔)和端子对母排电感的影响, 但也只是简单的研究。

本文系统研究关键物理结构对母排电感的影响, 先从母排的厚度  $t$  和间距  $d$  为研究点, 分析 3D 物理尺寸对母排电感的影响, 对经典解析公式进行修正并扩展公式的适用范围。同时也研究孔和端子对母排电感的影响, 合理解释了内在的电磁机理。最后, 通过双脉冲实验测试, 对仿真分析进行相关验证。

## 1 关键物理结构的影响

### 1.1 物理尺寸对电感的影响

针对图 1b 所示的两层平行板导体的叠层结构, 文献[6]提出其电感解析公式, 中国很多论文都直接引用该公式:

$$L_i = \frac{\mu_0 \mu_r l}{8\pi} \quad (1)$$

$$L_e = \frac{\mu_0 \mu_r l}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{t}{t+w} \right), \quad d \ll 2t, d \ll t+w \quad (2)$$

式中,  $L_i$ ——叠层母排的内电感, H;  $L_e$ ——叠层母排的外电感, H;  $\mu_0$ ——真空磁导率,  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m;  $\mu_r$ ——相对磁导率, H/m, 其值与导体材料有关。

为验证式(1)和式(2)的准确性, 采用电磁仿真软件 Ansoft Maxwell 3D 模拟仿真图 1b 所示的三维简化模型, 模型中设置母排的长  $l$  和宽  $w$  分别为 800 mm 和 400 mm 保持不变。此时可通过式(1)直

收稿日期: 2016-11-01

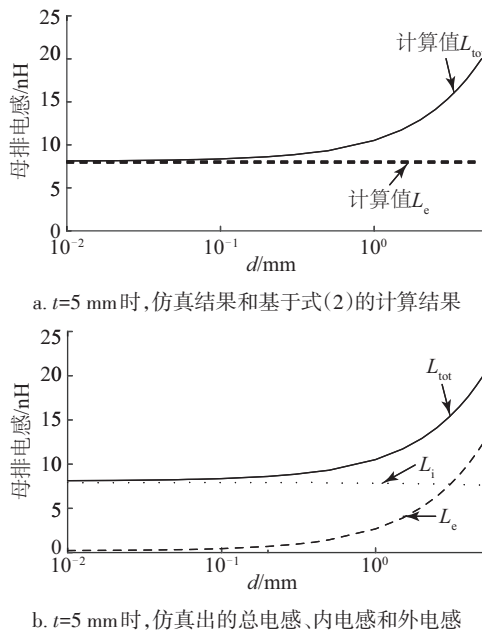
基金项目: 国家自然科学基金(51607053)

通信作者: 王佳宁(1985—), 男, 博士、副教授, 主要从事电力电子集成技术等方面的研究。jianingwang@hfut.edu.cn

接计算出母排的内电感  $L_i$  为 40 nH。

当  $t=5$  mm 时, 由式(2)计算出的母排外电感和通过仿真软件仿真出的总电感如图 2a 所示, 从图中发现当  $d \ll 2t$  时, 解析公式计算出的外电感与仿真出的总电感值近似相等。且式(1)计算出的母排内电感值甚至比仿真出的总电感还要大。

图 2b 示出在  $t=5$  mm 时, 仿真计算出的总电感、外电感和内电感, 可看到内电感  $L_i$  保持恒定, 而外电感  $L_e$  随着间距  $d$  的增加而增大。这是因为该叠层模型下外电感对应的电磁能量主要存储在两层铜板间的绝缘层区域, 间距  $d$  越大, 存储的电磁能量越多, 那么  $L_e$  越大。这个结论在其他的母排厚度下同样适用。



a.  $t=5$  mm 时, 仿真结果和基于式(2)的计算结果

b.  $t=5$  mm 时, 仿真出的总电感、内电感和外电感

图2 叠层母排的电感

Fig. 2 Inductances of the bus bar

根据 3D FE EM 仿真结果, 发现和文献[6]的某些结论有出入:

1) 式(1)给出的内电感计算公式并不准确, 文献[6]中的公式是参考文献[7]中的, 然而文献[7]中的公式所计算的是无限长的圆柱导线内电感, 不适用于矩形平面的导线结构。

2) 式(2)给出的外电感计算公式追根溯源引用的是文献[8,9]中的公式, 但这个公式计算的是总电感, 包括矩形母线排的自感和互感。

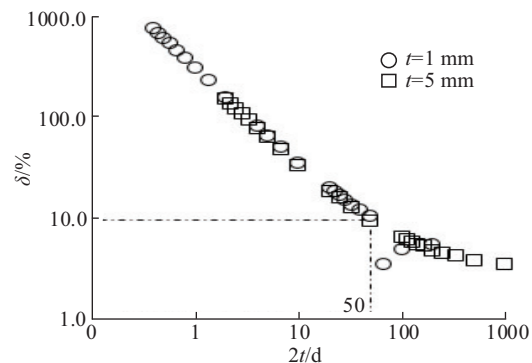
图 3a 给出在  $t=1$  mm 和  $t=5$  mm 时, 母排电感仿真值和公式计算值的误差分析, 定义误差的公式

如式(3)所示:

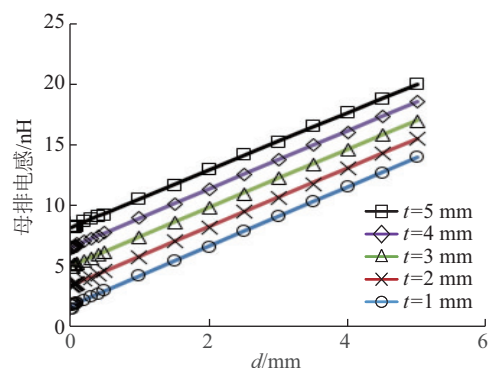
$$\delta = \frac{|L_{\text{tot\_sim}} - L_{e\_cal}|}{L_{e\_cal}} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $L_{\text{tot\_sim}}$  —— 仿真出的总电感;  $L_{e\_cal}$  —— 由式(2)计算出的外电感。

当  $2t/d > 50$  时, 误差小于 10%, 定义 10% 内为误差可接受范围, 母排电感可用式(2)来直接计算。但实际的母排尺寸往往并不满足这样的条件, 继续使用式(2)来计算母排电感会使计算值变得不准确, 即  $2t/d < 50$  时, 式(2)不再适用。图 3b 给出不同  $t$ 、 $d$  下的母排电感仿真值, 母排厚度  $t$  从 1~5 mm, 其范围覆盖了应用于大功率电力电子领域中的母排厚度, 从图 3b 中可看到, 在不同的母排厚度下, 总电感  $L_{\text{tot}}$  随着  $d$  的增加有线性增大的趋势, 斜率也几乎相同。



a.  $t=1$  mm 和 5 mm 时的计算误差



b. 不同  $t$ 、 $d$  下的母排电感

图3 不同  $t$  下, 母排电感仿真值与理论计算的误差分析

Fig. 3 Bus bar inductances at different thicknesses

## 1.2 孔对叠层母排电感的影响

真实的母排上有许多用以安装元器件的孔, 在逆变器背靠背系统中通常用来安装直流侧电容器和功率器件 IGBT。本节系统的分析孔对叠层母排

电感的影响,仿真模型参数设置如下:母排长  $l$  为 800 mm,宽  $w$  为 400 mm,厚度  $t$  为 1.5 mm,间距  $d$  为 3 mm。

### 1.2.1 单孔孔径

图 4a 为单孔位于母排中心位置的仿真模型。电流从上板流入,从下板流出。经 3D FE EM,可仿真出不同孔径下的母排电感值,虽然这不是实际的母排结构且母排安装孔也很小,但对探究叠层母排背后的电磁机理具有指导意义。从图 4b 可看出母排电感值随着孔径的变化情况,孔径越大,电感值越大。曲线看起来像一个指数函数,且在  $D > 200$  mm 时,电感增加速度变快。在研究中也发现,单孔的位置变化对母排电感值并无太大影响。

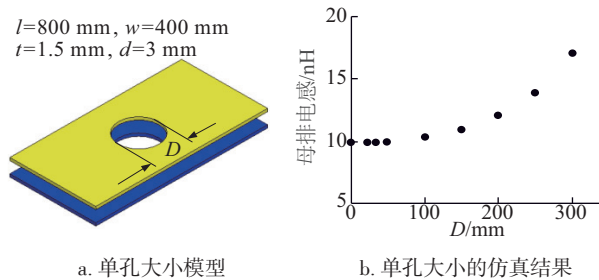


图 4 单孔大小对母排电感影响

Fig. 4 Effect of aperture size on the inductance of the bus bar

不同孔径下母排表面电流密度  $J$  和母排中间区域的磁感应强度  $B$  的分布情况如图 5 所示。图例中的色彩表由红色向深蓝色逐渐过渡,表示的是数值由大到小变化。从图 5 中可看到电流密度  $J$  和磁感应强度  $B$  有非常相似的分布趋势,当孔径  $D$  超过 200 mm 时,这 2 个量分布很不均匀。基于此

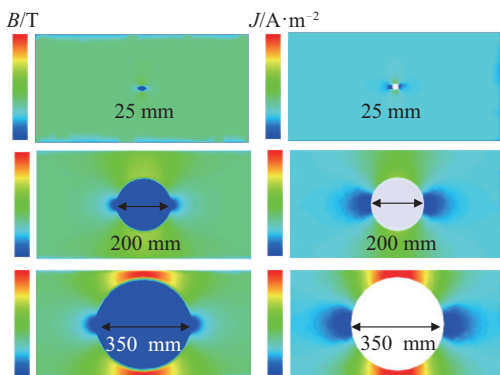


图 5 铜板表面磁感应强度  $B$  和电流密度  $J$  分布

Fig. 5 Distribution of  $B$  and  $J$  on the surface of the copper plate

本文提出假设:电流密度分布越不均匀,电感值越大。当孔在母排其他位置和多孔的情况下这个结论也能被验证。

### 1.2.2 多孔

真实母排上的安装孔是成对出现的,2 孔间的相对位置对母排电感的影响也值得研究,如 2 孔横向分布还是纵向分布能够给母排带来更小的电感。如图 6a 所示,在母排中心位置确定一孔,圆心为原点,另一孔圆心距原点距离为  $r$ ,与原点连线 and  $x$  轴正方向夹角为  $\theta$ ,改变变量  $r$ 、 $\theta$  即可确定两孔之间的相对位置。图 6b 给出 2 种孔径下,2 个孔之间不同位置的电感仿真值。可看到无论两孔之间位置如何变,仿出的电感值大小几乎一样。

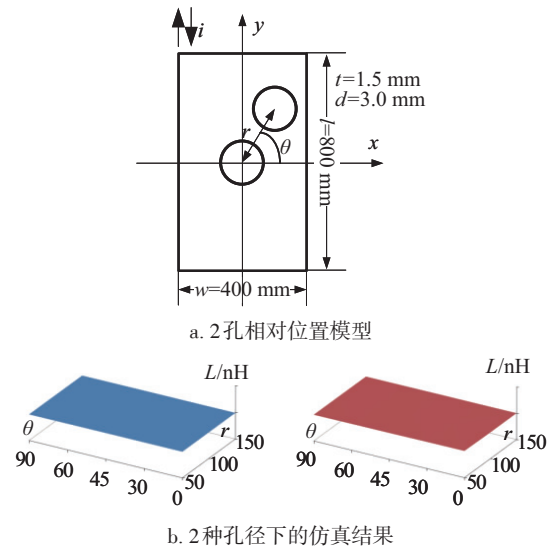


图 6 2 个孔的相对位置对母排电感影响

Fig. 6 Effect of relative positions of two holes on inductance

实际上叠层母排上的孔很多,对多孔不同位置进行建模分析也很困难,探究背后的电磁机理才是解决问题的有效途径。在研究单孔孔径对母排电感的影响时提出电流密度分布越不均匀,电感值越大的假设,参照数学中的标准方差概念,定义变量  $\sigma$  来衡量电流密度均匀程度:

$$\sigma = \frac{\oint_S |\text{Mag}(J) - \text{Ave}_{\text{Mag}(J)}|^2 \cdot dS}{S} \quad (4)$$

式中,  $S$  —— 计算域,即母排表面面积,  $\text{m}^2$ ;  $\text{Ave}_{\text{Mag}(J)}$  —— 计算域中电流密度平均值,  $\text{A}/\text{m}^2$ 。

在 Maxwell 3D 后处理计算器中输入公式中的相关参数可直接计算出  $\sigma$ 。单孔和多孔情况下的计算结果如图 7 所示,可直观看到,随着  $\sigma$  的增大,

电感值增大。这也验证了之前的结论,即母排电流密度分布越不均匀,母排电感值越大。单孔和多孔的情况下,这个结论均适用。

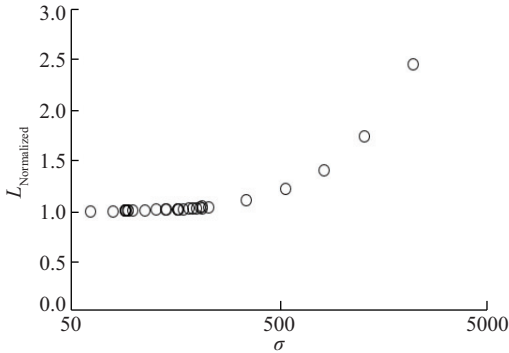


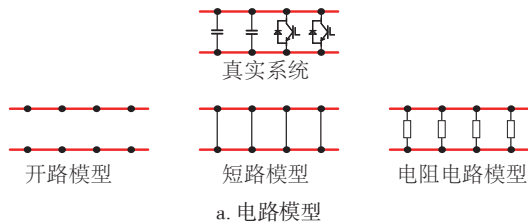
图7 不同电流密度标准方差的母排电感

Fig. 7 Inductance of bus bar as a function of  $Div_{MagJ}$

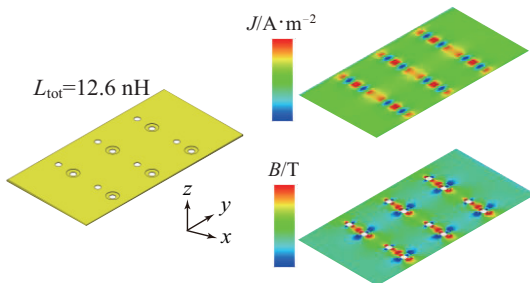
### 1.3 孔的连接

叠层母排的孔用以固定连接元器件,即直流电容器和开关管 IGBT。每个连接体中的电流由外部系统决定,且电流流经不断改变。不同分支中的电流会改变叠层母排的电磁分布,进而对母排电感产生影响。所以很难建立一个与真实母排连接系统相似的仿真模型。为了评估连接体对母排电感影响,建立 3 种不同的连接模型,分别是开路模型、短路模型和电阻电路模型。图 8 示出 3 种模型和其仿真结果。

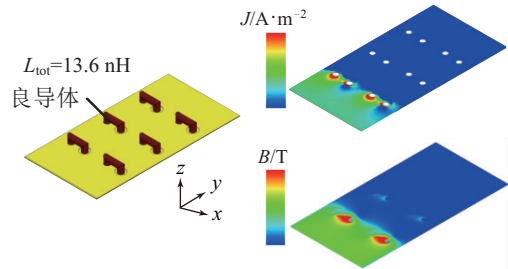
因电流流向的不同,3 种模型的电流密度  $J$  和磁感应强度  $B$  的分布各不相同。其中开路模型无连接器件,仿出的电感值即为叠层母排本身的电感,



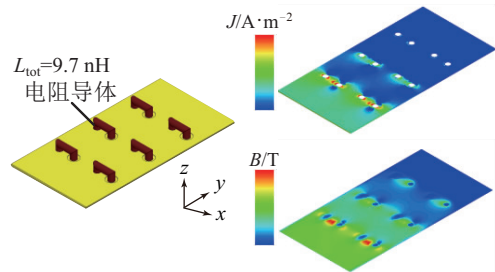
a. 电路模型



b. 开路模型的仿真结果



c. 短路模型的仿真结果



d. 电阻电路模型的仿真结果

图8 不同连接模型对母排电感影响

Fig. 8 Influence of the connection on the inductance of a bus bar

而带有连接器件后,不管连接件具有怎样的属性,电感也只是在极小的范围内变化,即在真实的系统中,直流电容器和开关管 IGBT 的存在对母排系统的电感变化无太大影响。

### 1.4 端子对母排电感的影响

母排结构中的端子,用来连接其他器件。简化的叠层母排端子结构如图 9 所示,其中  $k_1$ ,  $k_2$  分别为端子伸出部分和弯曲部分的尺寸,  $k_3$  是两端子间的距离。在研究中发现,  $k_1$  和  $k_3$  对母排的电感有一定影响,即  $k_1$  和  $k_3$  越大,电感值越大。所以在设计母排产品时,可考虑尽量将端子伸出部分的尺寸缩短或减小端子间的距离来降低母排本体带来的电感量。

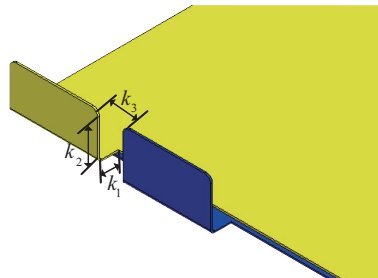


图9 母排端子的一些关键尺寸

Fig. 9 Some key sizes of the bus bar terminal

图 10 展示母排从最简易模型到有安装孔,有连接体,有端子母排的电感演变过程。尽管端子只是母排很小的一部分,但所带来的寄生电感却非常大,因为端子部分保留了平行板结构,相比叠层结构而言,其电感要大的多。

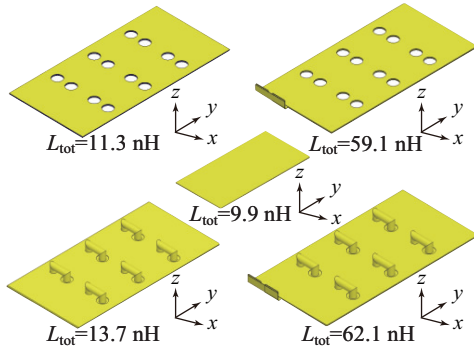


图 10 关键结构对母排电感影响演变图

Fig. 10 Evolution of key structures on bus bar inductance

图 11 对比了 2 种端子结构下的母排电感,可看到,将端子设计成叠层结构,电感变小,在电感性能上更有优势。

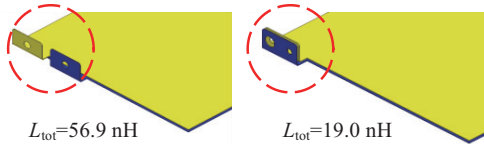


图 11 端子优化设计设想

Fig. 11 Optimization design of the terminal

母排系统很复杂,建立与真实母排完全一样的模型进行定量定性分析非常困难,但通过简易模型分析,也能得到相关结论,形成一套评估方法和优化手段。如在不影响电气连接条件下,可考虑将端子设计成叠层结构形式,其电感值会小很多,但考虑到造价,工艺等工程实际问题时,应寻求最优化的设计,在减小寄生电感的同时又能控制成本在一定范围内。

## 2 实验测试

为验证仿真值和仿真分析的准确性,本文对叠层母排进行了双脉冲测试。图 12 展示了测试平台母排部分。测试母排型号为 SG500MX-V61。DANFOSS DP900N1200TU104204 为实验所用到的 IGBT 模组。

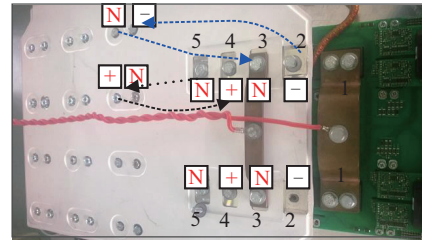


图 12 实验平台

Fig. 12 Experimental setup

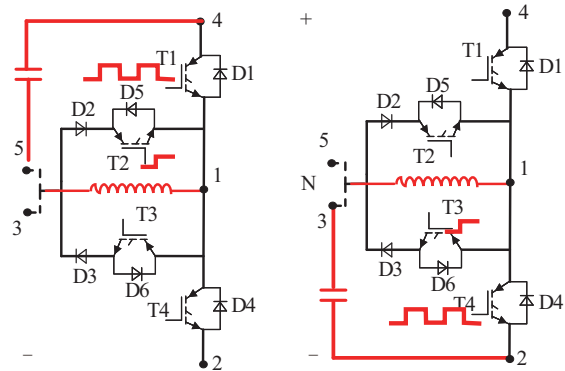
该测试母排应用于三电平光伏逆变器中,分别有正极(+)板,中性(N)板,负极(-)板。正极板与 N 极板之间的电感  $L_+$  和 N 极板与负极板之间的电感  $L_-$  可分别测出。根据双脉冲测试原理,当 IGBT 开通时,环流回路上的寄生电感(不包括 IGBT 模块内部寄生电感)可由式(5)计算:

$$L = \frac{\Delta u}{\Delta i} dt \quad (5)$$

式中,  $\Delta u$  ——开关处于开启瞬态时,漏电感引起的电压降;  $\Delta i$  ——开启瞬态时,流过开关管的电流变化。

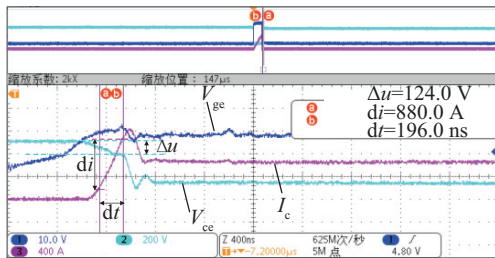
图 13a 示出测量正极板和 N 极板之间电感  $L_+$  的电路原理图,开关管 D5 短路并在 T1 上施加双脉冲。测得 T1 管波形和数据如图 13c 所示,因两模块并联,而测试的只是其中一个,所以图中的电流值应为实际的一半,根据式(5)可算出环路寄生电感  $L_+$  为 14 nH。此电感值为正半边母排电感。测试负极板和 N 极板之间电感  $L_-$  的电路原理图如图 13b,图 13d 是测得的波形和数据,同理可算出负半边母排电感为  $L_-$  为 20 nH。

图 14 示出仿真测试的母排模型,直流侧电容器和功率器件 IGBT 被简化为电阻式连接器,在实际安装中,直流侧电容器作为测试电路的电压源,

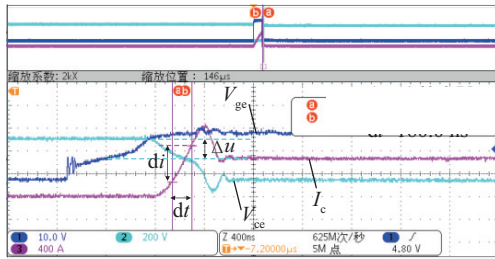


a. T1 管测试电路原理图

b. T4 管测试电路原理图



c. T1管测试波形



d. T4管测试波形

图13 双脉冲测试的电路及对应波形

Fig. 13 Circuit and corresponding waveform of double-pulse testing experiment

所以电流从电容器到 IGBT 流过母排主体而不是通过端子,基于此,在仿真中,电流从连接器中某一端施加,如图 14 所示。仿真出的正极板和负极板到 N 极板的电感分别为 16 和 15 nH。

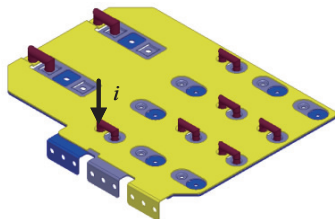


图14 仿真测试母排模型

Fig. 14 Simulation model of the measured bus bar

正负半边电感的仿真值和测试值有误差,可算出误差分别为 14%和 25%,此误差主要来自于 3D 有限元仿真误差。在仿真中,3D 模型与现实有以下区别:电容和 IGBT 用电阻性端子代替,实际装置的铜排和螺丝未建模,实际母排孔界面细节简化。以上简化是为了加速 3D 有限元仿真计算,否则会导致空间网格划分过多,计算机无法计算。同时,虽然做出简化,但并未带来数量级误差。本文研究并非希望得出实际装置精确值,而是找出关键结构对母排寄生电容的影响,故此误差在可接受范围内,能说明仿真分析的准确性。另外测试得到的正负半边电感值之间的差值( $L_+ - L_-$ )较大。主要是因

为,测试中正负半边实际电路参数一致性差异造成的。

### 3 结论

本文对叠层母排的关键结构进行系统化的研究,分析母排尺寸,安装孔,端子这些关键物理结构对母排电感的影响。最终的实验测试也验证了仿真结果的准确性,得出以下结论:

1)当母排厚度和间距满足  $2t/d > 50$  时,可用文献[9]中给出的经典公式来计算电感;反之,可参照文中给出的不同  $t$ 、 $d$  下,母排电感变化曲线图。

2)提出电流密度标准方差概念,即电流密度分布越不均匀,电感值越大。这个结论适用于单孔和多孔情况,母排表面连接的元器件也会影响母排电感,但这种电感变化在极小的范围内。

3)减小母排端子伸出部分尺寸、缩短端子间距,将端子部分设计叠层结构形式都能降低母排的整体电感量。

通过系统性研究叠层母排的寄生电感,可迅速预估母排实际电感,为工程师迅速判断母排电感数量级提供重要经验,同时为优化结构和外形尺寸以减小母排电感量提供一定的指导意义。

### [参考文献]

- [1] 赵争鸣, 张海涛, 袁立强, 等. 基于 IGCT 的高压三电平变频器失效机理及保护策略[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 1—6.
- [1] Zhao Zhengming, Zhang Haitao, Yuan Liqiang, et al. Failure mechanism and protection strategy of high voltage three-level inverter based on IGCT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 1—6.
- [2] Guichon J M, Aime J. Busbar design: How to spare nanohenries? [A]. Industry Applications Conference [C], San Diego, California, USA, 2006.
- [3] 汪 鋈, 杨兵建. 750 kVA 高功率密度二极管箝位型三电平通用变流模块的低感叠层母排设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 47—54.
- [3] Wang Jun, Yang Bingjian. Configuration of low inductive laminated bus bar in 750 kVA NPC three-level universal converter module of high power density [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 47—54.
- [4] Wen H, Xiao W. Design and optimization of laminated

- busbar to reduce transient voltage spike[A]. 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C], Hanzhou, China, 2012.
- [5] Rendusara D, Cengelci E, Enjeti P, et al. An evaluation of the DC-link capacitor heating in adjustable speed drive systems with different utility interface options[A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition[C], Atlant, USA, 1999.
- [6] Caponet M C, Profumo F, De Doncker R W, et al. Low stray inductance bus bar design and construction for good EMC performance in power electronics circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17 (2): 225—231.
- [7] Paul C R. Introduction to electromagnetic compatibility [M]. New York: Wiley, 1992, 247—250.
- [8] Giacoletto L J. Electronics designers Handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 1977, 3—44.
- [9] Grover F W. Inductance calculations [M]. Princeton: N. J. D. Van Nostrand Company, Inc., 2009, Equation 20, Part I.
- [10] Pasterczyk R J, Martin C, Guichon J-M, et al. Planar busbar optimization regarding current sharing and stray inductance minimization [A]. Power Electronics and Applications[C], Trondheim, Norway, 2005.

## EFFECT OF KEY PHYSICAL STRUCTURES ON LAMINATED BUS BAR INDUCTANCE OF INVERTER

Yu Shaolin, Zhang Xing, Wang Jianing

(School of Electrical Engineering & Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This paper addresses the effect of key physical structures on the laminated bus bar inductance, including the physical dimensions of the bus bar, the apertures through the bars and the terminals. Through the 3D finite element (FE) electromagnetic (EM) simulation, this paper analyzes the impact of the full range of key factors of inductance, and discusses the inherent electromagnetic mechanism in the study, a simple mathematical relationship between parasitic inductance and key structure has been proposed and corrected some existing conclusions after the systematic analysis. At the same time, this paper analyses the core factors effect of bus bar inductances, and presents some optimized designs.

**Keywords:** bus bar; inverter; parasitic inductance; 3-D FE analysis; electromagnetic mechanism