

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.03.016

基于结构的变流器母排杂散电感优化方法研究*

朱艺锋, 郑景乐

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要:针对大功率变流器功率开关关断时,由叠层母排杂散电感引起的瞬时高压问题,对叠层母排的杂散电感与其结构之间的关系进行了研究。利用 Q3D 软件对不同尺寸、开孔、开槽等母排常见的结构进行了建模与杂散电感提取,结合对母排中电流流通路径的分析,建立了不同母排结构与杂散电感大小之间的关系,提出了一种基于改善电流流通通道的低感母排结构优化方法。利用该方法对现有的一台有源电力滤波器母排进行了优化设计,采用双脉冲法实验对优化前后母排杂散电感进行了测量。研究结果表明,该优化方法可明显降低母排的杂散电感,并能有效地抑制功率开关关断瞬间所产生的电压冲击。

关键词:母排;杂散电感;变流器

中图分类号:TM645.1+1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)03-0293-05

Research on optimization method of stray inductance of converter bus bar based on structure

ZHU Yi-feng, ZHENG Jing-le

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Aiming at the problem of transient high voltage caused by the stray inductance of the stacked busbar when the power switch of the high power converter was turned off, the relationship between the stray inductance of the bus bar and its structure was studied. Through Q3D software, building the modeling of common simple structures of busbars of different sizes, openings, slots and extracting inductance extraction. The relationship between the busbar structure and the stray inductance was established by analyzing the current flow path in the busbar. A low sensitivity busbar structure optimization method based on improving the current flow path was proposed. By using this method, an active power filter busbar was designed optimally, and the stray inductance of the busbar before and after optimization was measured by double pulse method. The results show that the proposed method can significantly reduce the stray inductance of the busbar, and can effectively suppress the voltage impact caused by the instantaneous power switch off.

Key words: busbar; stray inductance; converter

0 引 言

现代电力电子变流器件越来越多地向高电压大电流的方向发展,以 IGBT 为代表的新型功率开关器件其电压等级可达 6 500 V,电流等级可达 3 600 A,开关时间在 0.2 μs 左右^[1],这使得功率开关在开通与关断

瞬间有很大电流变化。较大的 di/dt 使电路中的杂散电感产生瞬时的电压冲击,不仅减少了功率开关的使用寿命、增加了功耗,甚至可能会击穿器件^[2]。另外,对整个电路而言,电压过冲还会使电路输出谐波增加并且造成严重的电磁干扰。

为消除杂散电感所引起的电压过冲问题,通常的

收稿日期:2016-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1504518);河南省教育厅科技研究重点项目(14A470005);河南理工大学博士基金资助项目(72103/001/021)

作者简介:朱艺锋(1979-),男,河南南阳人,博士,副教授,主要从事大功率变流器的优化设计及高性能控制的研究. E-mail: zyf_science@126.com

方法有设计缓冲电路、软开关技术等^[3-4]。缓冲电路通过吸收杂散电感瞬时释放的能量而达到降低冲击电压的目的;而软开关技术主要降低了 di/dt , 使得电压过冲相应地减少^[5]。但是这两种方法需要有额外的电路设计及驱动, 这不仅增大了设计的难度, 也使产品的成本增高, 所以实际应用中多通过直接降低杂散电感的方法来抑制电路产生的电压过冲。

在整个功率模块拓扑结构中, 杂散电感主要由母排电感、支撑电容杂散电感、功率开关杂散电感以及连接螺柱的等效电感等等组成。其中, 除了母排的电感, 其余器件的杂散电感在出厂后都已固定, 其大小与厂商的生产工艺有关^[6], 所以设计出低感的母排结构, 是降低线路杂散电感的唯一途径。

本研究将通过 ANSYS Q3D 软件对母排进行建模与参数提取, 重点分析母排在不同尺寸、开孔及开槽情况下其杂散电感的变化规律, 并得出相应的优化方法。

1 叠层母排的结构与原理

叠层母排一般由导电层和绝缘层组成, 物理模型如图 1 所示。

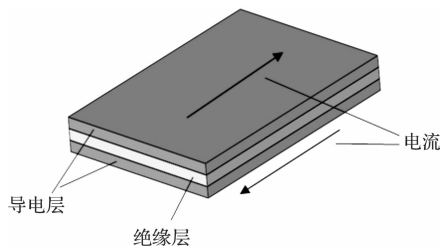


图 1 两层母排的物理模型

以图 1 的两叠层母排为例来说, 最上层与最下层是导电层, 常用的材料是紫铜板, 中间为绝缘层, 用以将两导电层隔离, 常用环氧树脂等绝缘材料^[7-8]。根据实际的需要, 有时也有三层、四层等多层母排结构的设计, 其结构原理不变。

叠层母排两导电层分别为电流的流入与流出, 这样就会在功率开关开通与关断时形成了一对镜像电流, 通过耦合的原理达到对杂散电感抑制的目的^[9]。

2 结构因素对母排杂散电感的影响

笔者通过 ANSYS Q3D 软件对母排长度、厚度、间距、开孔和开槽等常见结构因素对母排杂散电感的影响进行仿真, 研究其电感大小的变化规律, 对母排的低感设计提出科学的指导。本研究所用的母排模型如下: 母排的长宽厚分别用 l 、 w 和 h 表示, 母排的间距为 d ,

开孔半径为 ra 。若分别以宽度和长度方向作为 x 轴和 y 轴, 则开孔位置为 (kx, ky) , 开槽位置为 $(0, cy)$ 或 $(cx, 0)$, 两种开槽的尺寸分别为宽度方向上的槽深 cs_w 和槽宽 cw_w , 长度方向上的槽深 cs_l 和槽宽 cw_l 。母排的长宽厚 l 、 w 和 h 及母排间距 d 大的最大尺寸分别为 100 mm、50 mm、2 mm、2 mm。母排材料, 导电层用铜板, 绝缘层用相对介电常数为 4.8 的绝缘树脂。其各部分尺寸如图 2 所示。

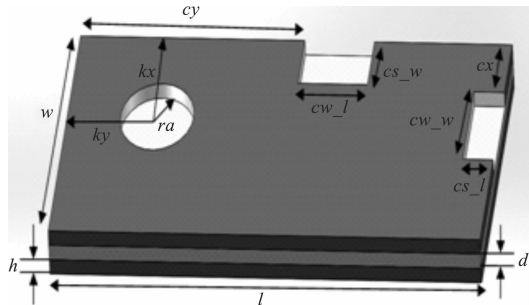


图 2 Q3D 中标注结构因素的母排模型

2.1 长度与宽度、厚度与间距对母排杂散电感的影响

在对长宽为变量的仿真中, 母排模型的厚度与间距分别为 $h = 2 \text{ mm}$ 、 $d = 2 \text{ mm}$ 。分析厚度与间距的影响时, 母排的长度与宽度分别为 $l = 100 \text{ mm}$ 、 $w = 50 \text{ mm}$, 仿真结果分别如图 3、图 4 所示。

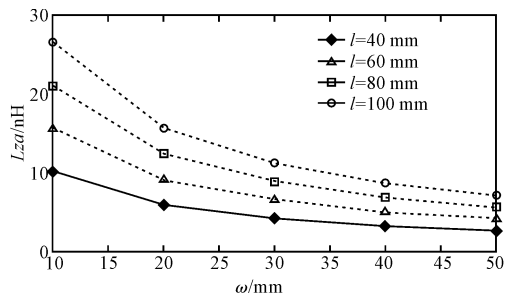


图 3 长度与厚度对杂散电感的影响

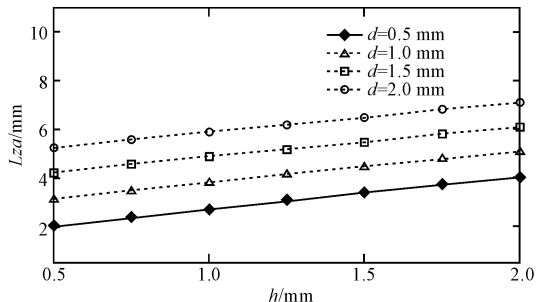


图 4 厚度与间距对杂散电感的影响

仿真结果说明, 母排杂散电感大小与其长度、厚度和间距正相关, 这三者尺寸越大, 对应的杂散电感也越大; 而与宽度负相关, 宽度越小, 对应的杂散电感越大。平板母排的理论计算公式近似为^[10]:

$$L_{za} \approx \frac{k\mu_0\mu_r l(h+d)}{w} \quad (1)$$

式中: μ_0, μ_r —真空磁导率和绝缘材料的相对磁导率; k —修正系数。

仿真结果得到的结果与公式(1)相吻合。总的来说,正、负母排间距越小、长度越短,使其围成的回路面积越小,对应的磁链和杂散电感越小。母排上的电流可近似的看成无数细导线电流在宽度和高度方向上叠加而成,所以母排的自感可理解为细导线并联而成,因此母排越宽,相当于并联导线越多,而使杂散电感下降。母排越厚,虽然自感下降,但互感绝对值也同时降低,解耦后,母排的电感增加,也可以理解为母排越厚,使其正负母排围成的回路面积增加,因而增加了电感量。

2.2 开孔大小及位置对杂散电感的影响

开孔的仿真分别在宽度方向和长度方向上进行,母排尺寸为 $l = 100 \text{ mm}$ 、 $w = 50 \text{ mm}$ 、 $h = d = 2 \text{ mm}$,宽度方向开孔时设 $k_y = 25 \text{ mm}$,改变 k_x 的值;长度方向上开孔时设 $k_x = 25 \text{ mm}$,改变 k_y 的值,其结果如图5、图6所示。

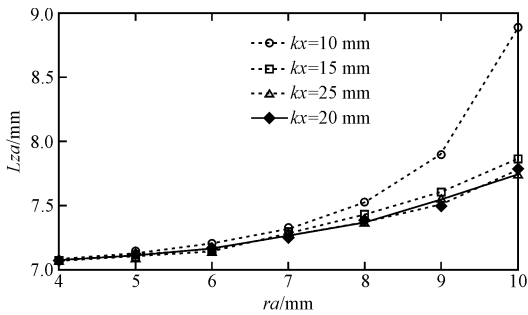


图5 开孔半径及其在宽度方向上位置对杂散电感的影响

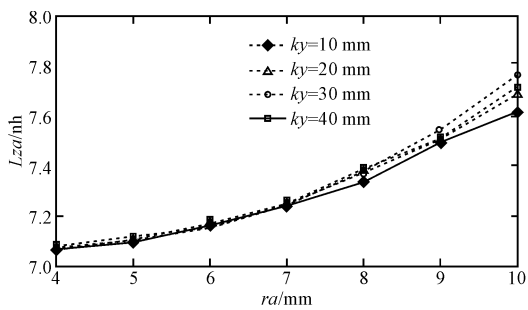


图6 开孔半径及其在长度方向上位置对杂散电感的影响

结果表明,开孔越大杂散电感越大,其原因是开孔阻断了部分电流的通道,这部分电流需绕过开孔,相当于增加了母排长度。同时还发现,开孔位置在宽度方向上变化时,越靠近边界杂散电感值相对越大,而开孔在中心位置时杂散电感最小,当开孔位置在长度方向变化时,开孔的位置对杂散电感几乎没有影响。对此分析,假设开孔靠近上边缘时,上边缘剩余连接部分窄于下边缘(见图7),则上边缘处阻抗大于下边,使更多电流绕行下半圆,而中间开孔时,则均匀上下绕行,所以

靠近边缘开孔会相对增大部分电流的路径,而使其电感值略有增加。

综上所述,母排的开孔半径越大、开孔位置越靠近边界,其杂散电感越大;反之,杂散电感越小。不同开口位置的电流路径如图7所示。

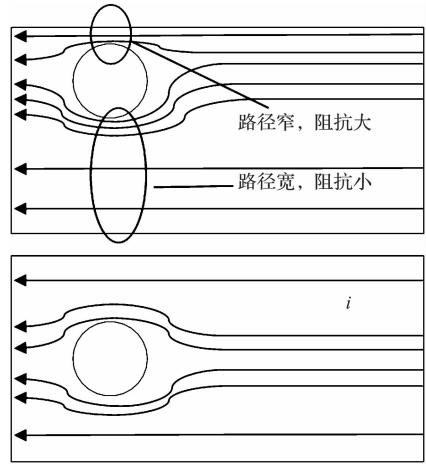


图7 不同开孔位置的电流路径

2.3 长度、宽度边上开槽深度及位置对杂散电感的影响

本研究对长度边沿开槽进行仿真,仿真模型的固定结构量为 $l = 100 \text{ mm}$ 、 $w = 50 \text{ mm}$ 、 $h = d = 2 \text{ mm}$,每次仿真针对开槽的深度(cs_w)、位置(cy)和槽宽(cw_l)、位置变化进行对比,两次分别取称 $cw_l = 40 \text{ mm}$ 、 $cs_w = 25 \text{ mm}$,仿真结果如图8、图9所示。

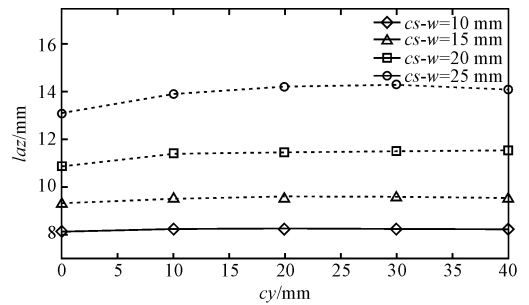


图8 长度方向上的开槽位置和深度对杂散电感的影响

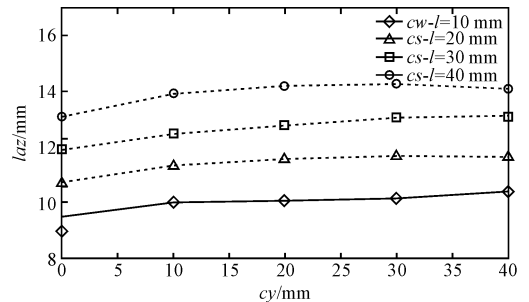


图9 长度方向上开槽时的开槽位置和宽度对杂散电感的影响
结果表明,开槽越深、越宽,越靠近边沿中间,杂散电感越大。对此可以解释为开槽越深增大了电流的流通过程;越宽电流通道越窄,相当于宽度减小。而开槽

位置的影响用电流路径来分析,以中间开槽与靠左开槽为例,两种情况电流路径 b 段与 c 段基本相同,所以电感量相等,但 a 段电流路径上部分为曲线,比 d 段的电流路径要长,所以综合起来中间位置开槽比靠两边时的杂散电感要大。中间开槽与靠左开槽电流路径如图 10 所示。

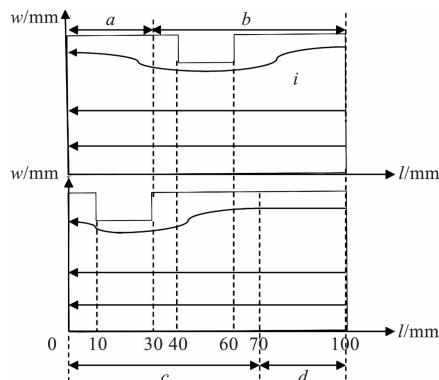


图 10 中间开槽与靠左开槽电流路径

本研究在宽度边沿上开槽进行仿真,结构模型 $l = 100 \text{ mm}$ 、 $w = 50 \text{ mm}$ 、 $h = d = 2 \text{ mm}$,分别进行改变槽深(cs_l)、位置(cx)和槽宽(cw_w)、位置(cx),两次仿真分别取 $cw_w = 20 \text{ mm}$ 、 $cs_l = 50 \text{ mm}$,其结果如图 11、图 12 所示。

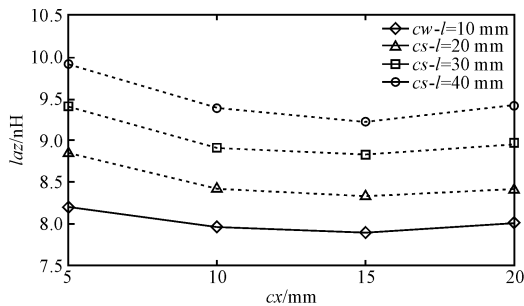


图 11 宽度方向上的开槽位置与深度对杂散电感的影响

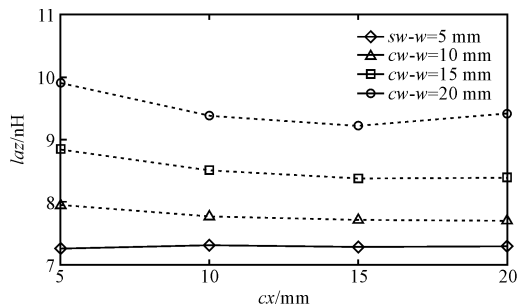


图 12 宽度方向上开槽位置与宽度对杂散电感的影响

从仿真结果可以看到,开槽越深、越宽、越靠近上下边沿时杂散电感越大。开槽越宽增加电流流路径、越深相当于减小了母排宽度。而开槽上、下位置不同带来的电感量不同同样可以用电流流路径来解释,其

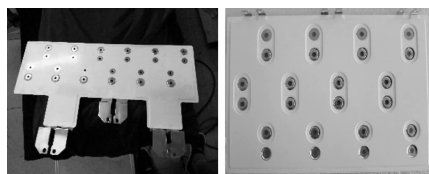
原理与开孔在宽度方向上因位置不同而引起的电感量变化一样,这里不再赘述。

3 基于结构的功率变流器直流母排杂散电感优化方法

杂散电感的大小与其上面的流通电流路径直接相关。因此,在设计低感母排时,应使母排上流通电流的路径尽量宽和短。具体来说,基于结构的功率变流器直流母排杂散电感优化方法为:在满足物理连接和机械强度的要求基础上,为获得较小的杂散电感,叠层母排在尺寸上应尽量短、宽、薄,间距应尽量小;母排上开孔、开槽的尺寸及数量应尽量减少;对于必要的开孔和宽度边沿的开槽,其位置应尽量地靠近母排的中间区域,长度边沿的开槽位置应尽量地靠近母排的角部区域。

4 实验及结果分析

为验证上述优化方法,本研究将实验室中一台有源电力滤波器上的母排进行优化设计,优化前后母排外形如图 13 所示。



(a) 优化前 (b) 优化后

图 13 母排优化前后实物

实验中用双脉冲法测试 U 相杂散电感 L_{za} ,笔者连接感性负载,所以 IGBT 关断瞬间负载电流近似不变,根据测得 IGBT 在关断瞬间的电压峰值与流过负载的电流值计算得出,计算公式为:

$$L_{za} \approx (U_{cem} - U_{steady}) \cdot \frac{\Delta t}{I_L} = \Delta U \cdot \frac{\Delta t}{I_L} \quad (2)$$

式中: U_{cem} —电压峰值, U_{steady} —电压冲击后达到的稳定值, Δt —关断电压首次上升到 U_{steady} 到电压到达峰值 U_{cem} 之间的时间差, I_L —负载电流。

实验原理图如图 14 所示。

据此方法对优化前后母排 U 相施加 1 500 V 电压,得出实验波形如图 15 所示。

本研究根据公式(2)求得母排优化前后杂散电感分别为 53.12 nH 和 38.51 nH。通过优化,母排杂散电感明显降低,这是因为优化前母排呈长方形,当左右端口输入输出电流时该形状会使电流的分布严重不均匀,并且母排的端口部分过长,这些都会使杂散电感增

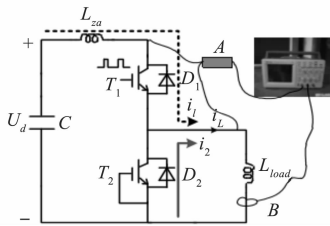


图14 测试杂散电感的实验原理图

A—高压差分探头;B—测高频电流的罗氏线圈

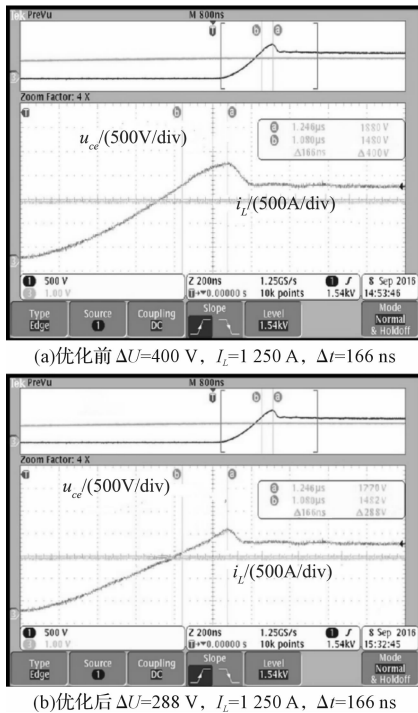


图15 U相上管IGBT关断时的电量波形

大。而优化后的母排呈正方形形状,并且缩短了母排的端口部分,在均流方面有所改善,所以杂散电感减小。

5 结束语

本研究针对叠层母排尺寸、开孔、开槽等情况对杂散电感的影响做了详细的仿真与分析。在仿真中也发现,母排的杂散电感与其通过的电流大小没有关系,当完成母排的结构时,它的杂散电感已经确定。笔者分析了不同结构对杂散电感的影响及其原因,提出了基于改善电流流通通道的杂散电感优化方法,该方法可

用于对低感直流母排设计进行理论指导。

最后需要说明的是,本研究对母排的基本结构做了分析,对于复杂的折弯、连接螺柱以及母排层数对杂散电感的影响规律未做研究。这些都有待同行们共同去完成,建立一套完整的母排结构对杂散电影响的理论指导意见。

参考文献(References):

- [1] 冯高辉,袁立强,赵争鸣,等.基于开关瞬态过程分析的母排杂散电感提取方法研究[J].中国电机工程学报,2014,34(36):6442-6449.
- [2] 陈明翊,马伯乐,陈玉其,等.低感母排技术在IGBT变流器中的应用[J].大功率变流技术,2012(6):14-17.
- [3] 董玉斐,罗皓泽,杨贺雅,等.1.2 MV·A混合钳位五电平变流模块的结构布局优化和叠层母排设计[J].电工技术学报,2016,31(8):11-18.
- [4] 易荣,赵争鸣,袁立强.高压大容量变换器中母排的优化设计[J].电工技术学报,2008,23(8):94-100.
- [5] YIN Kai, MA Ming-yao, HE Yuan-ming, et al. Research on threephase hybridclamped fivelevel PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE. 2012,32(12):59-66.
- [6] CAPONET M C, PROFUMOF F, DE DONCKER R W, et al. Low stray inductance bus bar design and construction for good EMC performance in power electronic circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002,17(2):225-231.
- [7] 汪 鋈,杨兵建,徐枝新,等.750kVA高功率密度二极管箝位型三电平通用逆变模块的低感叠层母线排设计[J].中国电机工程学报,2010,30(18):47-54.
- [8] 李方正,孙旭东,黄立培,等.大容量变流器复杂形状直流母线的PEEC建模[J].清华大学学报:自然科学版,2009,49(8):1089-1092.
- [9] KOURO S, MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010,57(8):2553-2580.
- [10] 赵 东,叶尚斌,张佳佳,等.大功率电力电子装置母排参数提取方法[J].电器与能效管理技术,2014(21):12-16.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

朱艺锋,郑景乐.基于结构的变流器母排杂散电感优化方法研究[J].机电工程,2017,34(3):293-297.

ZHU Yi-feng, ZHENG Jing-le. Research on optimization method of stray inductance of converter bus bar based on structure[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(3):293-297.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>