

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.02.011

高压 SVG 级联 H 桥模块等电位研究

邱文俊¹, 周方圆², 刘健³, 黄迪¹

(1. 株洲时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 中南大学, 长沙 412001;
3. 三一重工股份有限公司, 长沙 410100)

摘要: 高压级联型 SVG 装置由数个 H 桥模块级联而成, 由于其电压等级、绝缘要求高, H 桥模块不接地, 处于悬浮状态。IGBT 工作会产生大量的热量, 因此开关器件衬底需要紧贴散热器表面以更好的散热, 但同时也形成了较大的分布电容。散热器受 IGBT 开关电压和分布电容影响会感应电压, 悬浮散热器就相当于电磁辐射源, 会产生严重的电磁干扰。本文通过建立 H 桥模块近场耦合模型, 分析了散热器悬浮的危害, 并搭建仿真模型进行验证。最后针对散热器悬浮及等电位联结对模块电磁干扰影响的研究, 搭建试验平台, 通过多维度比较, 最终得到散热器直流中点等电位联结为最佳方式。

关键词: SVG, H 桥模块; 分布电容; 散热器悬浮; 电磁干扰; 等电位联结

Research on Equipotential of High Voltage SVG Cascaded H-bridge Module

QIU Wenjun¹, ZHOU Fangyuan², LIU Jian³, HUANG Di¹

(1. Zhuzhou CRRC Times electric Co., Ltd., Industrial drive technology Center, Hunan Zhuzhou 412001, China; 2. Central South University, Changsha 412001, China;
3. Sany Heavy industry Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: The high voltage cascade SVG device is composed of several H-bridge modules and is in suspension due to its high voltage level and insulation requirements as well as ungrounded H-bridge module. IGBT can, in case of operation, generate a large amount of heat, the substrate of the switching device therefore needs to be close to the surface of the radiator for better heat dissipation, but at the same time, it also forms a large distributed capacitance. The radiator which is affected by IGBT switching voltage and distributed capacitance will induce voltage and the suspension radiator is equivalent to electromagnetic radiation source, which can create serious electromagnetic interference. In this paper, the harm of radiator suspension is analyzed by setting up a near-field coupling model of H-bridge module, and a simulation model is set up for verification. Finally, a test platform is built to study the influence of radiator suspension and equipotential connection on module electromagnetic interference. Through multi-dimensional comparison, it is finally concluded that the equipotential connection at the DC midpoint of radiator was the best way.

Keywords: SVG; H-bridge module; distributed capacitance; radiator suspension potential; electromagnetic interference; equipotential connection

0 引言

随着电力电子技术的发展, 高压级联静止型同步无功发生器(static var generation, SVG)由于其性能的优越性, 应用越来越广泛, 同时其工作电压和输出容量也随之增大。目前高压 SVG 电路拓扑结构往往采用多单元级联方式^[1-12], 由于其高电压, 高

开关频率等特性, 工作时主电路会产生非常强的电磁干扰, 对内部电路的正常工作产生严重影响。同时高压级联 SVG 装置由于工作电压等级高, 为了满足绝缘要求, 模块一般不接地, 处于悬浮状态。IGBT 器件高频噪声会通过寄生电容耦合到散热器上, 悬浮电位使散热器变成一个电磁辐射发射源, 加上高压 SVG 装置功率模块数多、模块设计紧凑等特点,

使电磁环境更加恶劣。

近年来,许多学者对 PWM 变流系统传导干扰特性进行了研究^[13-20],但是主要研究的是输出线缆、负载对地分布电容耦合的共模干扰,而对变流器功率模块内部电磁干扰研究分析较少,针对高压级联 SVG 内 H 桥模块的电磁场分析更少。工程上,为了减小散热器悬浮带来的电磁干扰,一般采用散热器等电位进行钳位,常用的有直流中点、交流输出、直流负极 3 种等电位方式。国内、外对高压 SVG 功率模块散热器等电位联结方式研究较少,相关的文献非常少,给分析研究带来难度。此外,缺乏 3 种等电位方式的研究,不知道哪种等电位方式性能更优。因此,研究高压 SVG 功率模块散热器等电位具有重要意义。基于此,本文建立了 H 桥模块的近场耦合等效模型,分析了散热器悬浮的影响,并通过仿真得到散热器悬浮电位以及模块电压分布。最后,根据仿真结果对不同散热器等电位连接方式进行试验,根据多维比较,得到最佳联结方式。

1 散热器悬浮电磁特性研究

1.1 IGBT 开关特效研究

IGBT 不是理想开关,由于栅-源间存在结电容,导致 IGBT 开通、关断有延迟。IGBT 开关电压可用等腰梯形波等效^[21],其时域波形见图 1。

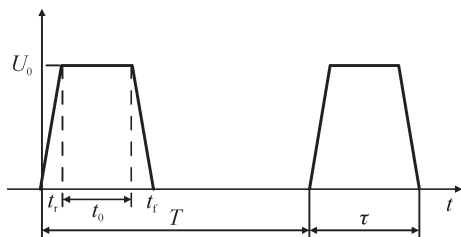


图1 等腰梯形时域波形

Fig. 1 Isosceles trapezoid time domain waveform

等腰梯形波傅里叶展开式为:

$$U(t) = U_0 \frac{\tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \quad (1)$$

其中

$$a_n = -n\pi \left(\frac{\tau + t_0}{T} \right) \quad (2)$$

$$C_n = 2U_0 \frac{\tau + t_0}{T} \frac{\sin\left(\frac{n\pi(t_0 + t_r)}{T}\right) \sin\left(\frac{n\pi t_r}{T}\right)}{\frac{n\pi(t_0 + t_r)}{T} \frac{n\pi t_r}{T}} \quad \tau = t_0 + t_r \quad (3)$$

IGBT 开通关断时间为纳秒级,导致 du/dt 很高。在较高 du/dt 尖峰电源的激励下,系统中的寄生电感、电容往往形成谐振,频率可达数十兆赫

兹。因此电力电子电路中干扰频谱是非常宽的,其频谱分布从工频一直到数十兆赫兹,一个典型的电路干扰频谱见图 2。

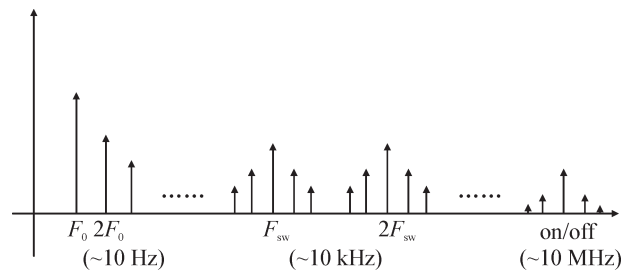


图2 典型电力电子电路干扰频谱分布

Fig. 2 Typical power electronic circuit interference spectrum distribution

图 2 中: F_0 是工频; F_{sw} 是开关频率;on/off 是开关器件开关产生的频率。第 1 类是电网电源的各次谐波;第 2 类是开关器件本身的开关频率及倍数频率附近的干扰;第 3 类干扰频率较高,达到数十赫兹,由开关器件通断时器件内部瞬变过程引起,主要体现在过高的 du/dt ,即为高频干扰源,也称为开关暂态干扰。在高频干扰源的激励下,系统中的分布电容、杂散电感往往容易形成谐振,并且谐振频率高,辐射能力强。

1.2 散热器悬浮的危害

H 桥模块主要由 IGBT 逆变桥臂、直流稳压电容、散热器、取能电路和控制电路板等组成,模块金属外壳与散热器通过固定螺钉电气连接。IGBT 模块管心与其金属基板只有一个很薄的绝缘层,为了更好散热,IGBT 基板通过一层散热硅胶紧贴着散热器。散热器面积较大,由导体平板原理,IGBT 基板和散热器间存在分布电容。图 3 所示为 H 桥电路高频等效模型,其中 VT_1 、 VT_2 和 VT_3 、 VT_4 为 H 桥 IGBT,分别由两个 IGBT 模块组成。 C_{d1} 、 C_{d2} 是 IGBT 基板与散热器的分布电容, C_p 是模块内部控制电路 PCB 板与散热器的分布电容, C_{d3} 、 C_{d4} 是电容正负极连接母排与散热器间的分布电容, C 为直流侧稳压电容。

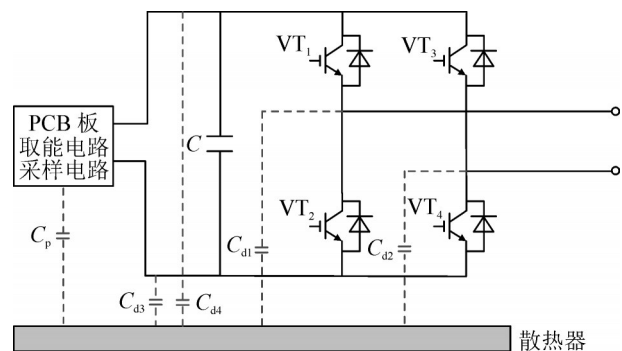


图3 H桥电路高频等效模型

Fig. 3 High-frequency equivalent model of H-bridge circuit

桥臂中点相对散热器形成很大的 du/dt , 通过分布电容对散热器进行充放电, 由于模块散热器悬浮, 散热器处于变化的电压状态, 形成悬浮电位。散热器的悬浮电位取决 IGBT 开关电压和其间的分布电容。散热器悬浮高频等效电路如图 4 所示^[22-23]。

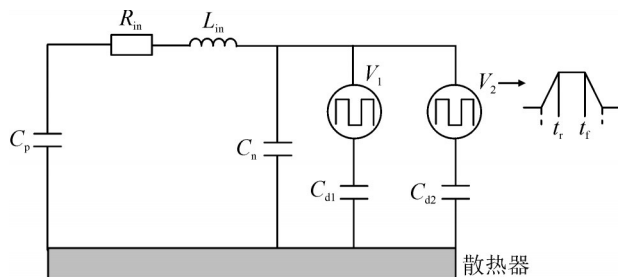


图 4 散热器悬浮高频等效电路
Fig. 4 Radiator suspension high frequency equivalent circuit

图 3 中, 由于支撑电容 C 的值较大, 在高频下可近似为短路, V_1 、 V_2 为 VT_1 和 VT_3 的两端的电压。 L_m 为母排杂散电感, R_m 为部件杂散电阻, $C_n = C_{d3} + C_{d4}$ 。散热器与 IGBT 模块、PCB 板之间的分布电容公式为

$$C_d = \varepsilon_0 \varepsilon_r A/d \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_0 = 8.8 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; ε_r 为绝缘介质相对介电常

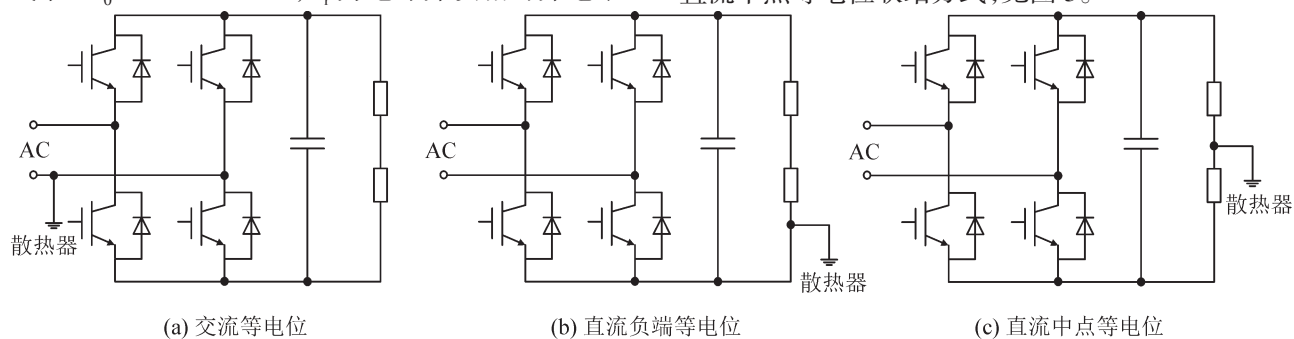


图 5 散热器等电位示意图
Fig. 5 Schematic diagram of equipotential connection of radiator

2.2 共模电流分析

散热器等电位联结后, 散热器电位与联结体相同, 散热器被钳位。部件间的电位将是恒定不变的, 其辐射能量降低, 模块与部件间的干扰减小。

图 4 中对于同一 H 桥模块, 有 $C_{d1} = C_{d2}$, 仅考虑 C_n 的情况下, 散热器悬浮共模电流见图 6。

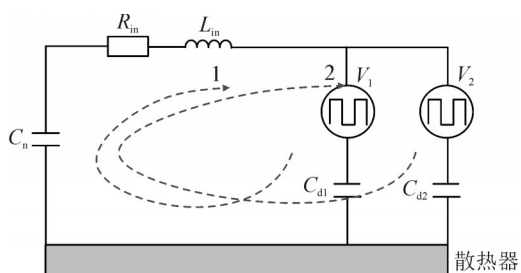


图 6 高频共模电流
Fig. 6 High frequency common-mode current

数; A 为两导体接触面积; d 为绝缘介质的厚度。

由于 V_1 、 V_2 含有高频时变分量, 悬浮散热器电位也含有时变高频量, 会产生辐射干扰。高压 SVG 功率模块中 IGBT 开关频率较低, 干扰频谱一般到数兆赫兹, 表现为近场电场干扰。同时还可以通过散热器与器件间的分布电容串扰到其他电路, 散热器在模块电磁干扰充当了重要的桥梁角色。

2 散热器等电位联结

2.1 散热器等电位联结

散热器悬浮相当于有限导电平面上的电磁辐射源, 充当电磁激励天线, 加剧模块内部的电磁环境^[24]。散热器不仅是良好的高频干扰耦合通道, 悬浮散热器还成为了辐射天线^[25]。可以通过合理布置部件减小分布电容减小共模干扰。高压变流模块级联数多, 体积受限等因数, 模块集成度高, 很难再有发挥空间。散热器面积大, 在模块内部与部件间的分布电容大, 耦合能力强。为了减小散热器悬浮电位的影响, 可以通过散热器等电位联结。根据系统电路的特点, 散热器一般有交流、直流负端以及直流中点等电位联结方式, 见图 5。

直流母线和连接母排之间的杂散电感与器件之间的分布电容将形成一个高频回路, 受高频尖峰激励产生谐振共模电流。散热器等电位联结后, 除了图 6 中 C_n 共模回路外, 还会增加一个散热器与联结体之间的共模电流路径, 以直流中点等电位联结为例, 如图 7 所示。

图 7 中, 共模电流会沿着联结导线经放电电阻回到干扰源, 由于电阻较大, 共模谐振电流小, 影响较小。对于散热器直流负极等电位联结, 增加了联结导线经开关器件结电容回到干扰源的共模电流路径; 对于散热器交流等电位联结, 增加沿着联结导线经输出铜排回到干扰源的共模电流路径, 见图 8。

图 8 中, C_j 为两个 IGBT 结电容并联等效值, L_{eq} 为联结交流输出回路等效电感。

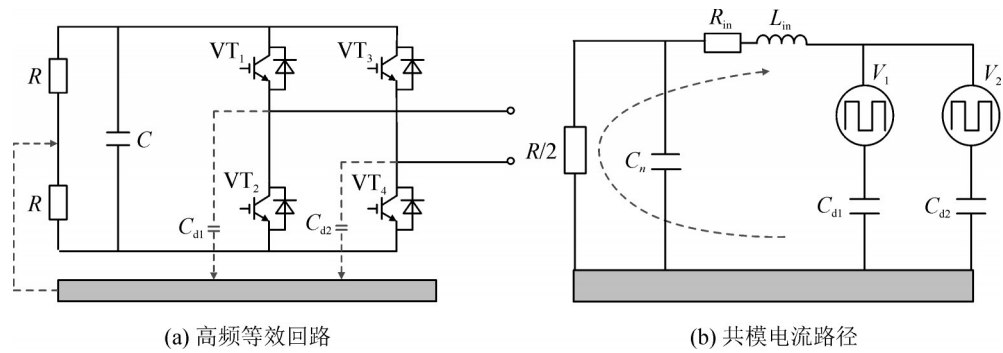


图7 直流中点等电位共模电流影响
Fig. 7 DC midpoint equipotential mode common-mode current

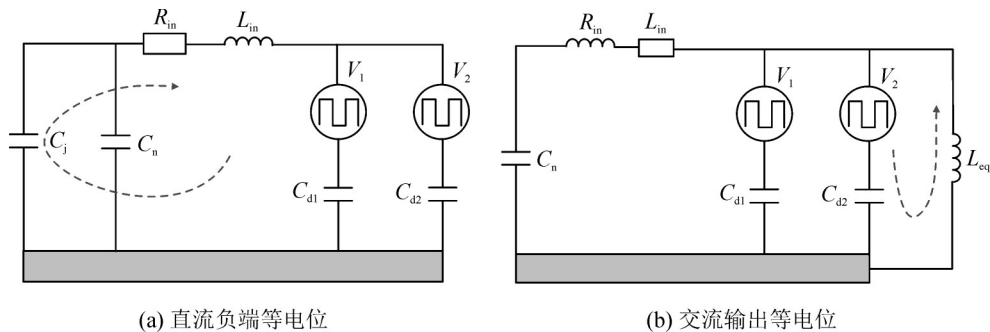


图8 直流负端、交流等电位联结共模电流影响
Fig. 8 Influence of common mode current on DC negative terminal and AC equipotential connection

由上述分析可知,散热器等电位联结后,散热器与联结导线为共模电流提供了一条路径,从而增加了传导 EMI。但是散热器悬浮,高频开关电流会流到散热器上,电荷会在散热器上聚集,使散热器成为一个电压激励的天线,从而增加了辐射 EMI。

3 仿真及试验验证分析

3.1 散热器悬浮仿真分析

建立 H 桥模块三维模型,利用仿真软件进行电磁场瞬态仿真,将 IGBT 激励波形导入模型中,得到模块的电压分布及悬浮散热器电压波形见图 9。其中 IGBT 的电压分布最强,受分布电容的影响,散热器耦合了较强的电压。模块内部的单元控制板也受电场耦合作用而感应较高电压,其中电容低感母排上方的控制板处电场干扰最强。由图 9 可知,散热器电位受 IGBT 开关电压耦合作用,为脉冲波形。散热器电位尖峰含量大,辐射能力强。

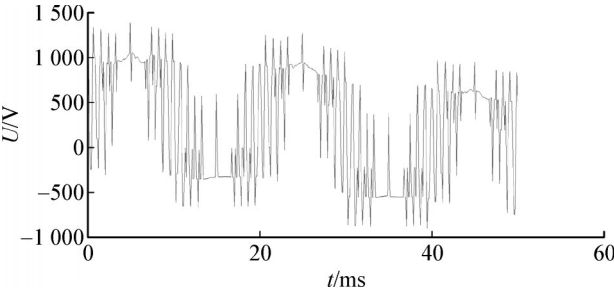


图9 散热器悬浮电位
Fig. 9 Suspension potential of radiator

3.2 等电位试验分析

采用 H 桥模块搭建相应的试验台,模块电源采用直流取能,开关频率 800 Hz,满功率运行。分别改变散热器的等电位联结方式,从电源共模电流、控制板干扰电场以及散热器对控制板地的电压三个维度进行比较分析。结合之前仿真结果,将电场探头布置在干扰较强的区域。测得散热器各等电位方式下共模电流频谱见图 10。图 10 中,ZHI 表示散热器直流中点等电位;JIAO 表示散热器交流输出端等电位;FU 表示散热器直流电容负极等电位;XUAN 表示散热器悬浮。

共模干扰波峰主要集中在 10 kHz 和数兆赫兹处,频谱趋势基本相同,共模电流在高频 1 MHz 处发生谐振。这验证了图 1 干扰频谱分布,开关器件的干扰主要分布在边带谐波和开关暂态干扰处。1 MHz 附近处各等电位方式下共模电流峰值见图 11。

由于模块电源采用直流电容取能,直流负端等电位联结导线增加了流入电容负极的共模电流路径,导致电源共模电流较大。其他 3 种方式电源共模电流大小基本一致。直流中点等电位联结虽然增加了流入直流侧共模电流路径,但由于放电电阻的存在,高频谐振分量可忽略。交流输出等电位增加了流入输出级的共模电流路径,对直流侧共模电流没有影响。各等电位方式电场干扰如图 12。

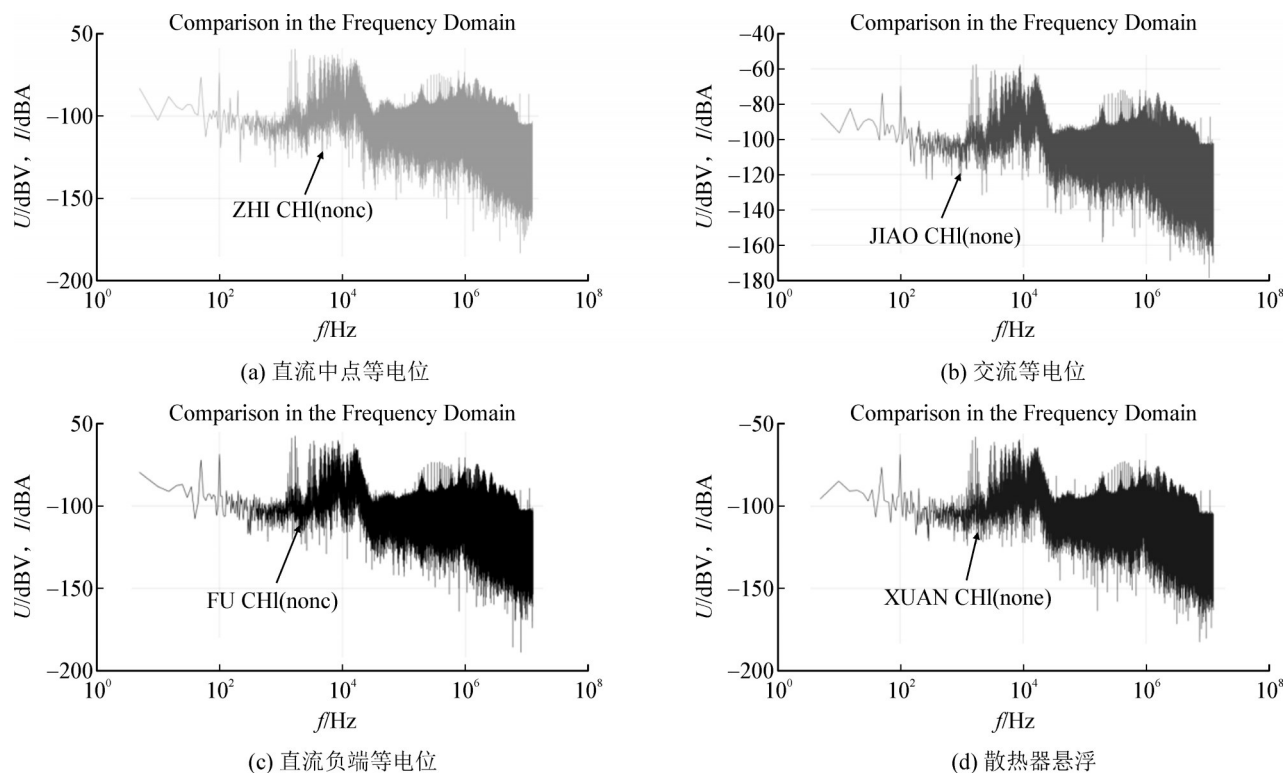


图10 散热器各方式下共模电流频谱

Fig. 10 Common-mode current spectrum under different equipotential connection modes of radiator

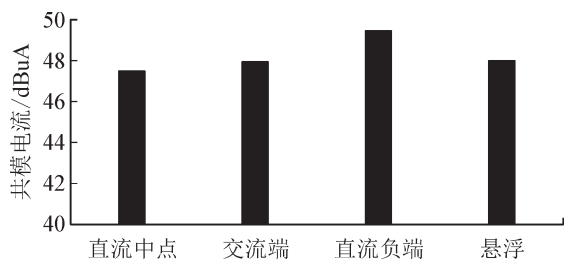


图11 共模电流峰值

Fig. 11 Common-mode current peak

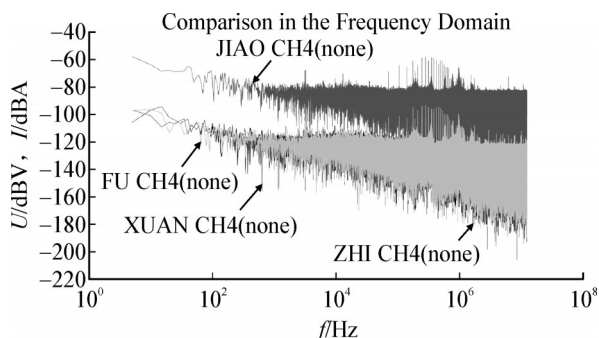


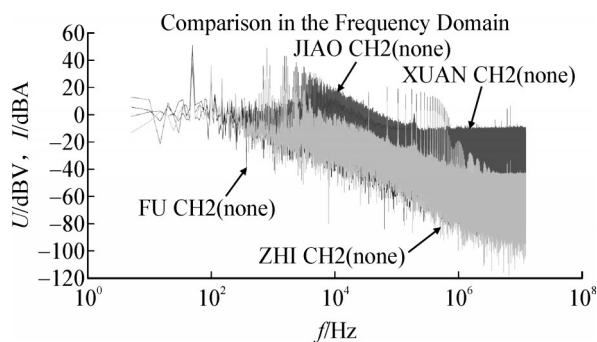
图12 电场干扰频谱

Fig. 12 Spectrum of electric field interference

不同等电位联结方式下电场干扰频谱趋势基本相同,均受高频干扰在1 MHz处出现干扰峰值。由图12可知,交流等电位方式的电场干扰远比其他几种方式严重的多,这主要由交流等电位联结增加的共模电流路径引起的。交流等电位联结导线

路径电阻小,共模电流谐振较大,产生较大的电场干扰。其他几种方式电场干扰相差不大。

控制电路板是模块内关键且最敏感的部件,很容易受电磁干扰而发生模块故障。模块内部散热器和控制电路板的面积较大,其分布电容较大,散热器与控制地之间电压的高频分量容易通过分布电容耦合,干扰电压控制板。比散热器-控制地(散-地)电压频谱分布见图13。

图13 散热器-控制地电压频谱
Fig. 13 Radiator-control ground voltage spectrum

控制板参考地电位是电路板上所有器件的参考电位,当参考电位受到干扰,很容易导致器件发生故障。受分布参数的影响,尤其是高频分量更容易干扰电路板。图13中,很明显看出在1 MHz以上时散热器悬浮电压干扰最大,干扰最高达128 dBV,远高于其他3种等电位方式。直流中点等电位散-

地电压高频分量最小,悬浮高频分量最大。直流中点等电位对单元控制板地干扰最小,散热器悬浮对单元控制板的干扰最强,特别是高频分量远远大于散热器等电位联结方式,高频分量辐射能力强,干扰作用强,散热器悬浮的危害在于其辐射能力强。

上述试验结果验证了 3.2 节的分析,即散热器等电位联结,传导 EMI 会更强;散热器悬浮相当于电压激励的天线,辐射 EMI 更严重。

散热器各方式下电源共模电流、控制板干扰电场和散热器-控制地电压高频分量比较见表 1。

表1 各方式下高频干扰分量比较

Table 1 Comparison of high frequency interference in different modes

等电位方式	共模电流/ dBuA	干扰电场/ dBA	散-地电压/ dBuV
直流中点	47.5	28	87
交流输出	48	62	110
直流负端	49.5	27	108
悬浮	48	25	128

通过以上数据,从模块电磁干扰角度综合比较,H 桥模块散热器采用直流中点等电位为最佳方式。

4 结语

本文通过 H 桥模块近场耦合模型分析了散热器悬浮的危害,并分析了 3 种散热器等电位联结方式的影响。通过仿真可以看出散热器受分布参数和 IGBT 开关电压影响,会感应高频脉冲电压,从而通过模块内部分布参数形成近场干扰。试验结果表明,IGBT 开关电压会产生边带谐波低频干扰和开关暂态高频干扰。散热器悬浮对模块内部部件相对电压的高频分量大,易对模块内部器件,特别是控制电路板造成干扰。散热器-单元控制板间的电压高频分量会通过分布电容耦合干扰单元控制板,在设计的时候应该合理布置减小两者间的相对面积,从而降低耦合干扰。试验结果表明散热器等电位联结,传导 EMI 加重;散热器悬浮相当于电压激励的天线,辐射 EMI 更严重。

从电源共模电流、控制板干扰电场以及散热器对控制板地的电压 3 个维度比较,散热器直流中点等电位方式最佳,对模块内部电磁干扰最小。此外,此分析结果对低压变流器以及不同拓扑变流器也具有参考意义。

参考文献

[1] 王伟明. 级联 H 桥静止同步补偿器关键技术研究与设计 [D]. 西安:西安电子科技大学,2014.

[2] 孙冰. 高压级联 H 桥静止同步补偿器研究[D]. 哈尔滨:

哈尔滨理工大学,2012.

[3] 丁稳房,毛雨阳,徐岸非. 针对不平衡电网的谐波检测新方法[J]. 电网与清洁能源,2022,38(5):71-78.

DING Wenfang, MAO Yuyang, XU Anfei. A new harmonic detection method for the unbalanced grid[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 71-78.

[4] 茅雨培,张顺仁,袁波,等. 基于系统运行方式的 SFC 启动过程电能质量优化策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2022,38(6):10-16.

MAO Yupei, ZHANG Shunren, YUAN Bo, et al. A study on power quality improvement strategy during SFC startup based on system operational method[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 10-16.

[5] 邵春伟. H 桥级联型静止无功发生器 SVG 的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.

[6] 谭风雷,朱超,邓凯. 适用于多电平 MMC-SVG 的简化 SVPWM 方法研究[J]. 浙江电力,2022,41(1):64-70.

TAN Fenglei, ZHU Chao, DENG Kai. Research on simplified SVPWM for multilevel MMC-SVG[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(1):64-70.

[7] 王科新. 高压级联型 SVG 控制方法研究与装置研制[D]. 长沙:湖南大学,2016.

[8] 樊伟. 级联式高压变频器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2011.

[9] 钱金跃,吴佳,施文杰,等. 基于 SVPWM 的 NPC 三电平逆变器简化 MPC 算法[J]. 浙江电力,2022,41(1):80-88.

QIAN Jinyue, WU Jia, SHI Wenjie, et al. Simplified MPC algorithm of NPC three-level inverter based on SVPWM[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(1):80-88.

[10] 罗天,汪可友,李国杰,等. 基于改进多馈入有效短路比的受端交直流混联电网 STATCOM 定容方法[J]. 电测与仪表,2022,59(2):133-140.

LUO Tian, WANG Keyou, LI Guojie, et al. STATCOM capacity-determine method based on modified multi-infeed effectivenesshort-circuit ratio in receiving-end AC/DC hybrid grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 133-140.

[11] 邵美阳,张子墨,王露缙,等. 一种无功功率扰动的孤岛检测新方法[J]. 电网与清洁能源,2023,39(6):98-107.

SHAO Meiyang, ZHANG Zimo, WANG Lujin, et al. A new islanding detection method for reactive power disturbance[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 98-107.

[12] 张晓英,侯秉臣,王琨,等. 基于改进天牛须算法的含固态变压器的配电网无功优化[J]. 高压电器, 2022, 58(11):221-229.

ZHANG Xiaoying, HOU Bingchen, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with solid state transformer based on improved beetle antennae search algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 221-

- 229.
- [13] GRANDI G, CADADEI D, REGGIANI U. Common - and differential - model HF current components in AC motors supplied by voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 16-24.
- [14] RAN L, GOKANI S, CLARE J, et al. Conducted electromagnetic emissions in induction motor drive systems time domain analysis and identification of dominant modes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(4): 757-767.
- [15] 裴雪军, 张凯, 康勇, 等. PWM 逆变器共模干扰电流的衰减和抑制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 80-84.
- PEI Xuejun, ZHANG Kai, KANG Yong, et al. Damping and suppression of common mode interference currents in PWM inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 80-84.
- [16] 孟进, 马伟明, 张磊, 等. PWM 变频驱动系统传导干扰的高频模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 141-146.
- MENG Jin, MA Weiming, ZHANG Lei, et al. High frequency model of conducted EMI for PWM variable-speed drive systems[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(15): 141-146.
- [17] 方仍存, 雷何, 杨东俊, 等. 变流器辅助换流的柔性切换开关拓扑与控制[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 43-49.
- FANG Rengcun, LEI He, YANG Dongjun, et al. A converter-assisting flexible switch topology and its control strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 43-49.
- [18] 伍科, 卜健怡, 郭童, 等. 适用于中抽式 Scott 牵引变压器的负序补偿方法[J]. 变压器, 2023, 60(3): 59-64.
- WU Ke, BU Jianyi, GUO Tong, et al. Negative sequence compensation method for Scott traction transformer with secondary midpoint drawn-out[J]. Transformer, 2023, 60(3): 59-64.
- [19] 杨德勇, 闵建军, 范祝霞, 等. 变流器传导干扰分析与磁环抑制作用研究[J]. 大功率变流技术, 2014(6): 33-39.
- YANG Deyong, MIN Jianjun, FAN Zhuxia, et al. Conducted interference analysis and magnetic core suppression research for converter[J]. High Power Converter Technology, 2014(6): 33-39.
- [20] 陈庆, 葛雪峰, 史明明, 等. 多台电力电子变压器云-边脉宽调制同步控制策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 128-135.
- CHEN Qing, GE Xuefeng, SHI Mingming, et al. The cloud-edge signals based PWM synchronization strategy for multi-power electronic transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 128-135.
- [21] 马伟明, 张磊, 孟进. 独立电力系统及其电力电子装置的电磁兼容[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [22] 张凯, 方华松, 周运斌, 等. 单相全桥逆变器共模等效电路研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 51-56.
- ZHANG Kai, FANG Huasong, ZHOU Yunbin, et al. Common-mode equivalent circuit of single-phase full-bridge inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 51-56.
- [23] 路宏敏, 梁昌洪, 李晓辉, 等. 开关电源散热器的辐射发射[J]. 电波科学学报, 2005, 20(2): 241-246.
- LU Hongmin, LIANG Changhong, LI Xiaohui, et al. Radiated emissions from heatsinks in SMPS[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(2): 241-246.
- [24] 谢仁和. 功率变换系统内近场电磁干扰特性的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [25] 严冬. 功率变换器的瞬态电磁干扰特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- 作者简介:**
- 邱文俊(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事电能质量治理装置技术研究。E-mail: 67217975@qq.com。
- 周方圆(1979—), 男, 正高级工程师, 主要从事电能质量治理技术及牵引供电系统研究。
- 刘健(1993—), 男, 工程师, 主要从事电力电子变流技术研究。
- 黄迪(1985—), 男, 工程师, 主要从事电能质量治理装置技术研究。