

地铁车辆逆变系统共模传导干扰全电路模型分析

王雷¹,葛研军¹,李常贤²,孙燕楠³

(1.大连交通大学 机械工程学院,辽宁 大连 116028; 2.大连交通大学 轨道交通装备国家地方联合工程研究中心,辽宁 大连 116028; 3.大连交通大学 机车车辆工程学院,辽宁 大连 116028)

摘要:为了预测地铁车辆逆变系统中开关器件高速动作产生的共模传导干扰,以额定功率 190 kW 逆变器构成的地铁车辆逆变系统作为研究对象,首先对其干扰源和干扰路径进行分析,通过 Ansys Q3D 软件及阻抗分析仪提取地铁车辆逆变系统共模传导干扰路径各组成部件的高频参数;其次搭建地铁车辆逆变系统共模传导干扰全电路模型,通过 Ansys Simplorer 软件对地铁车辆逆变系统共模传导干扰全电路模型进行仿真分析;最后将仿真预测结果与现场测试结果进行比对,在 150 kHz~3 MHz 频率范围内仿真预测结果与现场测试结果基本吻合,在 3~30 MHz 频率范围内由于并网试验、台架布线、测试传感器转移阻抗等因素的影响,仿真预测结果与现场测试结果出现大约 8 dB 的误差,由此证明所设计的全电路模型建模及分析的正确性。

关键词:逆变系统;共模;电磁干扰;全电路等效

文献标识码:A **DOI:**10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.019

随着电力电子技术的快速发展,正弦脉冲宽度调制 (SPWM) 和空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 被广泛运用到三相逆变系统中^[1-2]。由于逆变系统开关器件 (如 IGCT、IGBT、MOSFET 等) 的生产材料不断更新,开关频率不断提高,大大提升了开关器件的动态响应过程^[3-4]。开关器件长期工作在大电流、高电压的工况下,形成较大的电压、电流变化率,产生丰富的高次谐波成分^[5-7],在逆变系统各结构部件高频参数的作用下,出现严重的共模传导干扰。共模传导干扰不但影响负载电机的正常工作,减少其使用寿命,而且给系统的安全可靠运行带来严重的影响。

现有文献对电力电子系统共模传导干扰的研究主要集中在开关电源、BUCK 电路、单相 PWM 变频器、电动汽车电机控制系统等^[8-11]。对动车组、地铁等大功率逆变系统研究相对较少。Revol 等^[12]通过构建共模传导干扰等效模型,对逆变器进行建模及仿真预测。李广卓^[13]通过对共模传导干扰的干扰源和耦合路径的分析建立共模传导

干扰等效模型,通过仿真频谱与实测频谱对比来验证等效电路模型的有效性。许珂等^[14]主要对逆变器共模干扰源进行建模,分析了 3 种共模干扰路径,通过对共模传导干扰模型进行仿真和试验测试,验证所提出方法的有效性。目前针对逆变系统共模传导干扰的建模及仿真分析主要采用的方法是构建逆变系统共模传导等效模型,进行共模传导干扰的仿真预测,这种方法的特点是能够发现逆变系统中关键参数对共模传导干扰的影响,但是在建模过程中容易忽略一些重要部件的高频影响^[15]。

本文以额定功率 190 kW 逆变器构成的地铁车辆逆变系统作为研究对象,根据共模传导干扰的机理搭建地铁车辆逆变系统全电路模型,通过 Ansys Q3D 软件及阻抗分析仪提取逆变系统 IGBT、叠层母排、动力线缆等部件高频参数,利用 Ansys Simplorer 软件对地铁车辆逆变系统共模传导干扰进行仿真预测,将仿真预测结果与现场测试结果进行比较,验证全电路模型的有效性和准确性。

收稿日期:2023-03-13

基金项目:辽宁省教育厅自然科学基金项目(2019-ZD-0088)

第一作者:王雷(1985—),男,讲师。E-mail:wanglei.0726@163.com

通信作者:李常贤(1973—),男,教授。E-mail:lichangxianzju@163.com

1 逆变系统共模传导干扰机理研究

本文以额定功率 190 kW 逆变器构成的地铁车辆逆变系统作为研究对象。地铁车辆逆变系统由两个对称的逆变功率模块组成,功率模块结构及电气原理图见图 1、图 2。功率模块直流输入电压为 1 500 V,直流侧滤波环节采用 5 mH 电抗器与 4 300 μF 支撑电容组成,电抗器与支撑电容构成二阶低通滤波器,能有效抑制高频干扰进入逆变器主电路。其中 VT1~VT8 表示 8 个 IGBT,开关频率为 750 Hz,VD1~VD8 表示 IGBT 反向并联二极管,C2~C5 为突波电容,其作用是减小 IGBT 关

断过程中过电压的幅值。Z 为阻感性负载,A、B、C 为三相桥臂中点,O 为负载电机中性点。

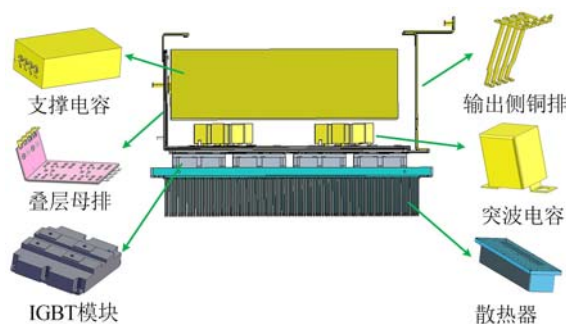


图 1 逆变功率模块结构图

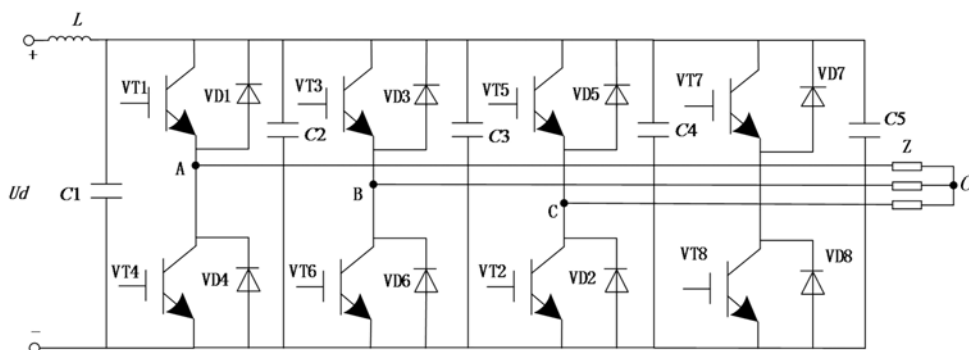


图 2 逆变功率模块电气原理图

1.1 共模传导干扰源分析

地铁车辆逆变系统共模传导干扰产生机理与功率开关工作状态有密切关系。图 3 所示为本文所用英飞凌 FZ1000R33HE3 型号 IGBT 漏源极两端实测电压波形。可知干扰源主要由两部分组成:一部分是由功率开关上升沿和下降沿电压变化率 (dv/dt) 引起,这与功率开关本身特性相关;另一部分是由振荡波形所引起,这与功率开关工作过程中端口间寄生电容、回路中杂散电感等因素相关。研究表明,在高频范围内振荡波形产生的干扰信号所占比重较小,开关器件上升沿和下降沿的电压变化率是共模传导干扰的主要干扰源^[16]。

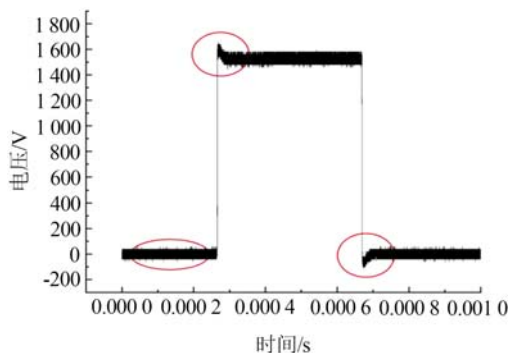


图 3 IGBT 漏源极两端实测电压波形

功率开关 IGBT 漏源极两端的电压理论上是方波,但实际是梯形波,其示意图见图 4。图中直流侧的电压为 V_{DC} ,梯形波的周期为 T ,梯形波的上升时间和下降时间分别用 t_r 、 t_f 表示,并且 t_r 和 t_f 相等。IGBT 的开通时间为 t_{on} ,梯形波的频率 $f_0 = 1/T$,占空比 $d = t_{on}/T$, n 为谐波次数,梯形波经过傅里叶变换可以得到其幅频特性,电压幅值为^[17]:

$$V = 2dV_{DC} \left| \frac{\sin(n\pi d)}{n\pi d} \right| \left| \frac{\sin(n\pi t_f f_0)}{n\pi t_f f_0} \right| \quad (1)$$

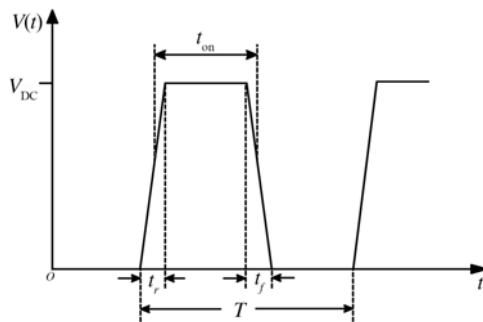


图 4 开关器件梯形波示意图

在开关频率、占空比等参数不变的情况下,直流侧电压幅值越大,梯形波的上升和下降时间越短,产生的电磁干扰越强烈。逆变器的干扰源除

了 IGBT 外,控制模块驱动信号产生的电磁干扰也是干扰源之一,但是其幅值要小得多。因此功率开关工作过程中产生的电压变化率是地铁车辆逆变系统的主要干扰源。

1.2 共模传导干扰耦合路径分析

地铁车辆逆变系统共模电流是由桥臂中点电压变化率 (dv/dt) 与系统部件对地寄生电容相互作用产生。

系统部件对地寄生电容主要由 IGBT 对散热器的寄生电容、三相交流输出动力线缆对机壳的寄生电容、电机绕组对机壳的寄生电容组成。由

此分析共模传导干扰的耦合路径见图 5 中虚线所示,其中 C_{con} 为桥臂中点对散热器的寄生电容, C_p 为三相输出动力线缆对地寄生电容, C_m 为电机绕组对电机外壳的寄生电容。主要耦合路径为:① IGBT→ C_{con} →公共地→直流侧线缆→逆变器。② IGBT→交流侧线缆→ C_p →公共地→直流侧线缆→逆变器。③ IGBT→交流侧线缆→电机绕组→ C_m →公共地→直流侧线缆→逆变器。路径上流经的共模电流加载在三相输出线缆上,通过天线效应对外辐射。

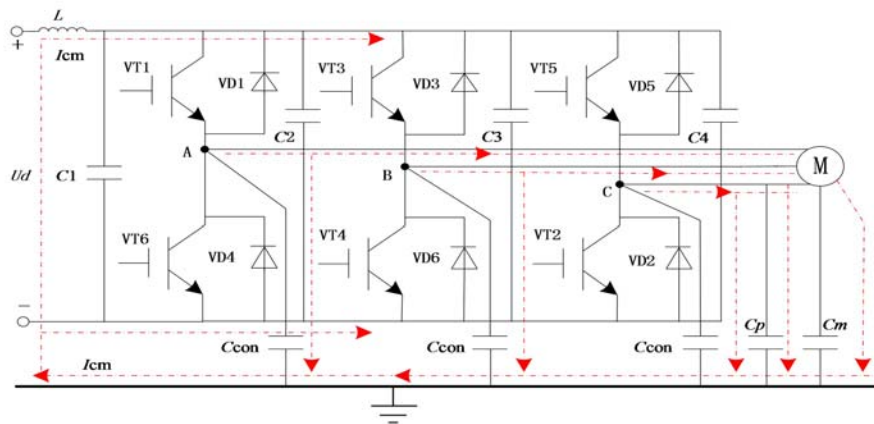


图 5 共模传导干扰的耦合路径

2 共模传导干扰全电路模型构建

2.1 铜排、叠层母排及线缆高频参数的提取

地铁车辆逆变系统作为大功率的传动系统,工作在高电压、大电流的工况下。工程上常用叠层母排和铜排作为连接导体。在 150 kHz~30 MHz 频率范围内,叠层母排和铜排自身的高频阻抗参数对整个逆变系统干扰回路共模阻抗有一定的影响,不可忽略,因此需要提取叠层母排和铜排的高频阻抗参数。铜排的电感由内电感和外电感两部分组成,其中内电感是由铜排导体层内部的漏磁通产生,与流过导体层电流的频率有关。外电感主要与铜排的物理结构相关,与流过电流的频率无关。

其内电感和外电感的表达式见式(2)、式(3)^[18]:

$$L_{in} = \frac{2}{\omega \delta \sigma w} \quad (2)$$

式中: L_{in} 为铜排内电感; w 为铜排的宽度; σ 为导体的电导率; ω 为角频率; $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu f \sigma}}$ 为该频率下

电流趋肤深度。

$$L_{out} = \frac{\mu_0 \mu_r l}{\pi} \left[\ln \left(\frac{d}{h+w} \right) + \frac{3}{2} \Delta_k + \Delta_e \right] \quad (3)$$

式中: L_{out} 为铜排外电感; l 为铜排长度; h 为铜排厚度; d 为通流导体间距; μ_r 为相对磁导率; μ_0 为真空磁导率; Δ_k 和 Δ_e 为修正系数,受母排几何结构影响。

叠层母排交流电感由正负铜排自感 L_s 和正负铜排之间互感 M 组成。叠层母排自感 L_s 、互感 M 的表达式见式(4)、式(5)^[19]:

$$L_s = L_{in} + L_{out} \quad (4)$$

$$M = \frac{\mu_r}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{d^2 + l^2} + l}{d} \right) - \sqrt{d^2 + l^2} + d \right] \quad (5)$$

铜排和叠层母排交流电阻 R 的近似表达式为:

$$R \approx \frac{\rho}{\delta} \left(\frac{L}{\pi D} \right) \quad (6)$$

式中: ρ 为导体电阻率; L 为导线长度; D 为导线直径。

本文采用 Ansys Q3D 软件在准静态电磁场下通过有限元法提取铜排和叠层母排高频参

数。根据电流或功率流向及端口实际电流接触面设置网络激励源“sink”、“source”并设置扫频范围为 10 kHz~30 MHz,扫频步长为 10 kHz,共设置 3 000 个扫描点,上述步骤完成后,对模型的有效性进行自动验证并仿真提取参数。图 6 为输出侧铜排交流电阻、交流电感幅频特性仿真结果,图 7 为叠层母排交流电阻、交流电感幅频特性仿真结果。

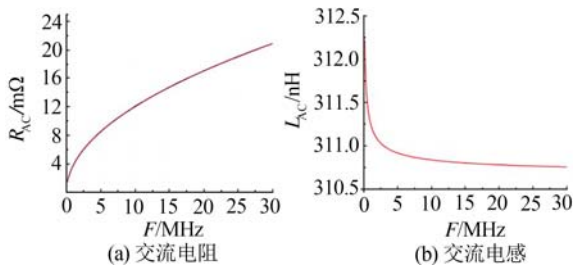


图 6 铜排交流电阻、交流电感幅频特性仿真结果

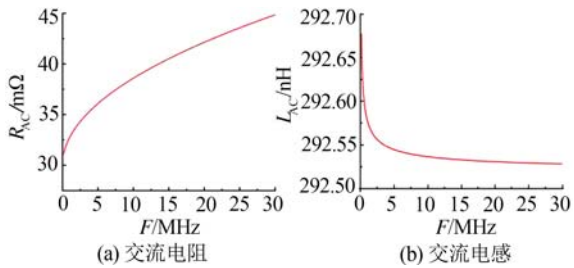


图 7 叠层母排交流电阻、交流电感幅频特性仿真结果

功率模块外侧主要是供电线缆,低频条件下一段不长的供电线缆可视为理想传输线缆,但是共模传导的频率范围较宽,因此供电线缆不可视为理想传输线,传输线上的杂散参数不可忽略。本文利用 Ansys Q3D 软件提取逆变器和牵引电机之间线缆的高频等效参数。功率模块外侧 U 相输出线缆交流电阻和交流电感仿真结果见图 8。

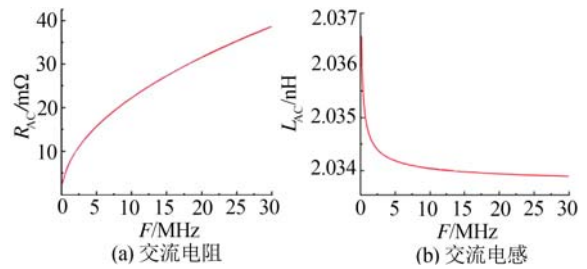


图 8 U 相输出线缆交流电阻、交流电感幅频特性仿真结果

2.2 寄生电容的提取

地铁车辆逆变系统功率模块散热器与机壳相连,接入大地。散热器作为共模传导干扰回路的重要组成部分,与其他结构部件之间的寄生电容,是影响逆变系统共模传导干扰的重要因素。本文利用 Ansys Q3D 软件对逆变系统功率模块、叠层母排、散热器等各结构部件之间寄生电容进行仿真,其电容仿真值见表 1。

表 1 各结构件之间电容仿真值

结构件	正母排	负母排	散热器	U 相输出	V 相输出	W 相输出	斩波铜排
正母排	7.29	2 078.12	6.78	2.69	3.50	3.35	2.70
负母排	2 078.12	7.32	11.94	138.73	310.85	328.98	120.38
散热器	6.78	11.94	20.30	6.47	12.02	12.50	6.01
U 相输出	2.69	138.73	6.47	1.57	1.51	0.03	0.01
V 相输出	3.50	310.85	12.02	1.51	3.02	0.89	0.03
W 相输出	3.35	328.98	12.50	0.03	0.89	2.44	1.24
斩波铜排	2.70	120.38	6.01	0.01	0.03	1.24	0.51

三相逆变桥臂中点对散热器之间存在不可忽略的寄生电容。当功率器件进行高频通断响应时,桥臂中点对地形成较大的电压变化率,不断对寄生电容进行充放电,形成共模干扰电流。桥臂中点对地寄生电容为:

$$C_{con} = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\epsilon_r A}{h} \quad (7)$$

式中: ϵ_r 为功率开关 IGBT 与散热器绝缘层之间相对介电常数; A 为散热器的面积; h 为绝缘层的厚度。

本文中 IGBT 集电极与散热器之间的寄生电容通过阻抗分析仪进行提取,得到电容值约为 867 pF。

2.3 全电路等效模型的构建

根据地铁车辆逆变系统的电气原理,结合结构部件的高频特性搭建如图 9 所示的全电路模型。全电路模型主要由以下几部分组成:① 直流输入侧(主要由直流电源、直流侧铜排、线缆、电抗器及支撑电容组成);② 功率模块(主要由叠层母排、逆变电路、散热器等结构部件组成);

③ 功率模块外侧(主要由三相输出线缆和负载电机组成)。

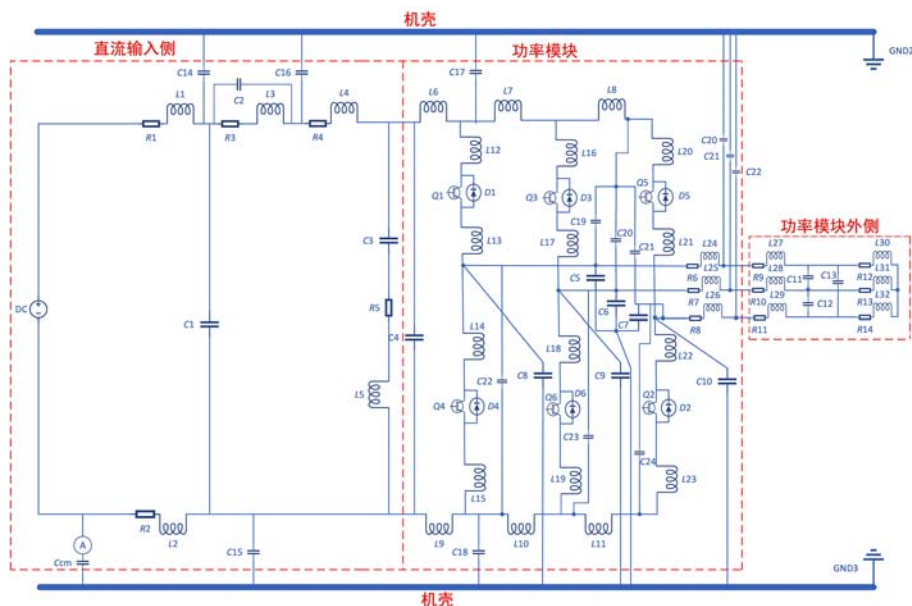


图9 地铁车辆逆变系统全电路模型

3 仿真与测试验证

3.1 共模传导电磁干扰测试方法

地铁车辆逆变系统传导干扰的测试总体框图见图10。按照标准 EN 55022:2010 传导发射(交流电源端口)测试的相关要求,采用一块 2 m×1 m 铝板作为参考地,将 LISN(线性阻抗稳定网络)放置铝板上,地铁车辆逆变系统的散热器与大地相连。LISN 的简化电路图见图 11,LISN 在测试中的作用为:150 kHz~30 MHz 频率范围内提供 50 Ω 恒定的阻抗,为待测设备提供传导干扰通道;LISN 中的 LC 低通滤波器阻止来自电源的干扰影响待测设备。传导干扰共模电压的测试通过测量 LISN 中 50 Ω 两端的噪声电压 V_1 、 V_2 获得,共模电压为:

$$V_{CM} = (V_1 + V_2) / 2 \quad (8)$$

由于地铁车辆逆变系统功率较大,测试中所需的 LISN 需要订制,订制 LISN 的成本高、周期长。本文为了测试方便并降低成本,采用电流测试法,将直流输入侧正负动力线缆同时穿过电流探头。由于差模电流大小相等,方向相反,差模电流的影响互相抵消,电流探头测量的值为共模电流的大小 I_{CM} 。共模电流与共模电压的关系为:

$$V_{CM} = 25I_{CM} \quad (9)$$

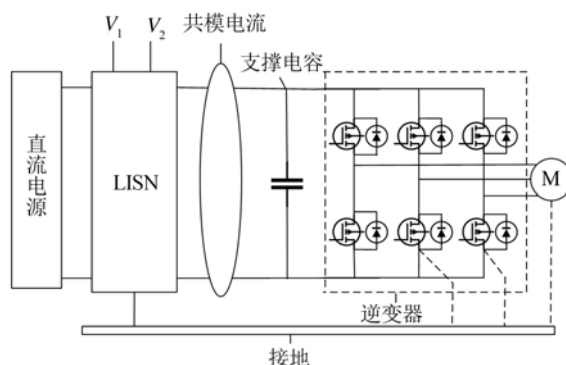


图10 传导干扰测试总体框图

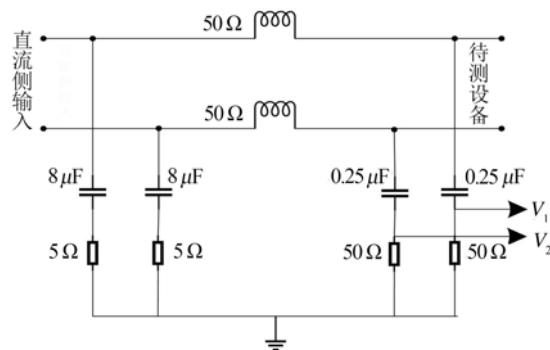


图11 LISN 简化电路图

3.2 仿真与测试验证

地铁车辆逆变系统共模干扰仿真分析是在一个较宽的频率范围进行的,单一的频点下对逆变

系统结构部件进行仿真提取建模,会造成整个逆变系统共模传导干扰仿真结果无法较好地反映系统宽频特性,在提取完逆变系统结构部件 3 000 个扫描点后,使用状态空间电路模型对各频点寄生参数进行全局拟合,通过 Ansys Simplorer 中的 Add State Space 命令,采用 RLC 等效形式,将各频点的寄生参数仿真结果等效为状态空间电路模型,功率模块 IGBT 的开关状态由 Ansys Simplorer 自带的 PWM 模块进行控制。为了验证图 9 所示全电路模型正确性,本文利用 Ansys Simplorer 对全电路模型进行建模仿真。根据共模传导干扰耦合路径相关理论分析,本文在仿真过程中通过测量直流输入测负极和地之间电容 C_{cm} 流过的电流来实现共模电流的仿真提取。仿真中的频域结果通过 Origin 软件进行 FFT 变换获得,为了满足傅里叶变换的精度要求,仿真和试验测试的采样频率都设置为 500 MHz。

共模电流仿真结果与试验测试结果见图 12,共模传导干扰仿真频谱与试验测试频谱见图 13。由图 13 可知,共模传导干扰的主要能量集中在 1 MHz 以下的低频段,1~30 MHz 范围内共模干扰衰减较快,

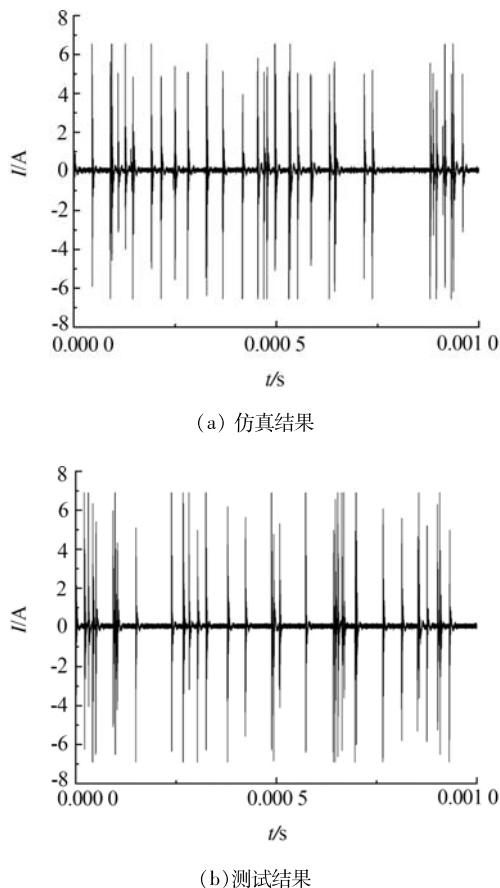


图 12 地铁车辆逆变系统共模电流的仿真与测试结果

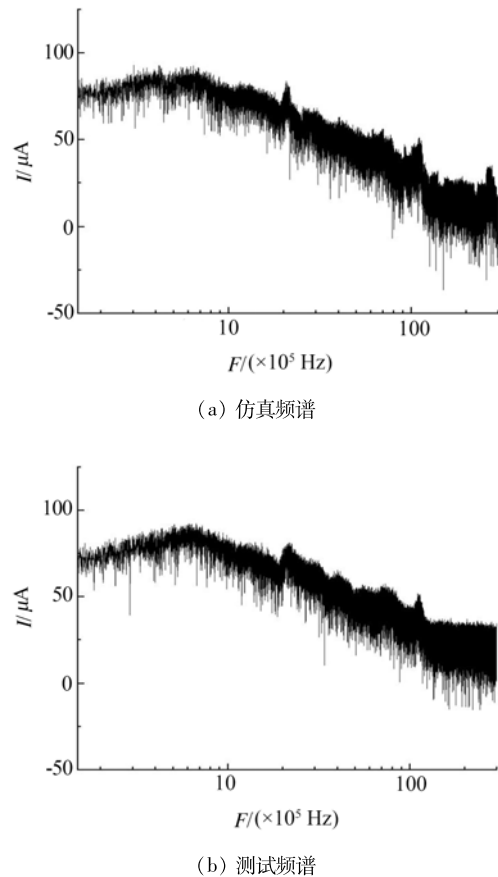


图 13 地铁车辆逆变系统共模电流仿真与试验测试频谱

因此抑制低频段共模传导干扰有助于改善地铁逆变系统电磁兼容特性。在 150 kHz~3 MHz 频率范围内,试验测试结果与仿真预测结果匹配度很高,误差很小,在 3~30 MHz 范围内试验测量结果和仿真预测结果出现了大约 8 dB 的误差,产生误差的原因:

(1) 并网试验。在进行共模传导干扰试验过程中,现场还有其他的设备正在运行工作,其产生的干扰影响测试结果;同时由于各个设备共地,其他设备的干扰很容易耦合到被测设备上。

(2) 台架的布线。由于接地线缆较长,接地线缆与逆变器三相输出线缆之间相互交错,在高频段产生比较复杂的耦合关系。

(3) 电流传感器转移阻抗的影响。本文测试所用的电流传感器为 HVPD HFCT 高频电流传感器,测试频带宽度为 100 kHz~150 MHz,在高频段必须考虑转移阻抗的影响并进行补偿,在实际工程中难以对电流探头进行有效的校准,同时,在高频段电流探头的连接线也会受到电磁干扰的影响,造成高频段测试误差。

4 结论

本文以 190 kW 逆变器构成的地铁车辆逆变系统为研究对象,从共模传导干扰的干扰源和耦合路径两个角度对地铁车辆逆变系统共模传导干扰的机理进行研究,通过试验测量及 Ansys Q3D 软件提取地铁车辆逆变系统结构部件的高频参数,从而搭建全电路模型。利用 Ansys Simplorer 软件对全电路模型进行仿真分析,在 150 kHz~3 MHz 范围内试验测量结果和仿真预测结果匹配度很高,误差很小;在 3~30 MHz 范围内由于并网试验、台架布线、测试传感器转移阻抗等因素的影响,出现大约 8 dB 误差,证明了本文搭建的全电路模型预测方法的准确性。该方法可作为预测三相地铁车辆逆变系统共模传导干扰的一种可行性方案。

参考文献:

- [1] 裴雪军,康勇,熊健,等. PWM 逆变器共模传导电磁干扰的预测[J]. 中国电机工程学报,2004(8):86-91.
- [2] XU C, MA Q, XU P, et al. Closed-loop gate drive for single-ended forward converter to reduce conducted EMI [J]. IEEE Access, 2020(8):123746-123755.
- [3] 张海玮. 三相逆变器传导干扰的抑制[D]. 天津:天津大学,2019.
- [4] 段卓琳,范涛,张栋,等. 全 SiC 三相逆变器传导电磁干扰建模与预测[J]. 电工电能新技术,2018,37(1):1-7.
- [5] 李文鑫. 列车牵引系统模块单元传导电磁干扰建模及仿真研究[D]. 杭州:浙江大学,2021.
- [6] KUMAR M, JAYARAMAN K. Design of active common mode noise voltage canceler for SiC inverter fed induction motor drive with reduced common mode voltage PWM [C]// 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Netherlands: Del, 2020: 695-700.
- [7] 向洋霄. 三相两电平变流器传导电磁干扰的建模与抑制方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
- [8] 高会壮,王香芬,张芮,等. 高速光耦瞬态共模抑制性能的电路仿真方法[J]. 现代电子技术,2018,41(4):60-64.
- [9] HAN D, MORRIS C T, SARLIOGLU B. Common-mode voltage cancellation in PWM motor drives with balanced inverter topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017,64(4):2683-2688.
- [10] HUANG X D, PEPA E, LAI J S, et al. Three-phase inverter differential mode EMI modeling and prediction in frequency domain[C]// 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference. Salt Lake City:[s. n.], 2003:2048-2055.
- [11] 葛研军,关成平,潘林,等. 直线型 Halbach 阵列永磁悬浮装置研究[J]. 大连交通大学学报,2020,41(6):57-62.
- [12] REVOL B, ROUDET J, SCHANEN J L, et al. EMI study of three-phase inverter-fed motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011,47(1):223-231.
- [13] 李广卓. 大容量变流器叠层母排杂散电感性能分析[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [14] 许珂,汪泉弟,安宗裕,等. 全桥变流器共模干扰等效模型分析[J]. 电源技术,2013,37(10):1824-1826.
- [15] LAI J S, HUANG X D, PEPA E, et al. Inverter EMI modeling and simulation methodologies[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006,53(3):736-744.
- [16] 王建渊,栗俊明,陈晓焯,等. 逆变器共模电压干扰及抑制措施研究[J]. 电源学报,2023,21(4):195-201.
- [17] 许哲翔. 地铁牵引系统传导干扰建模及影响因素分析[D]. 杭州:浙江大学,2021.
- [18] 安宗裕. 混合动力汽车直流电源变换系统传导电磁干扰分析与抑制研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [19] LUSZCZ J. Modeling of common mode currents induced by motor cable in converter fed AC motor drives[C]// 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Long Beach:[s. n.],2011:459-464.

Full Circuit Model Analysis of Common Mode Conduction Interference in Inverter System of Subway Vehicles

WANG Lei¹, GE Yanjun¹, LI Changxian², SUN Yannan³

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Rail Transit Equipment, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 3. School of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: In the inverter system of subway vehicles, the high speed operation of the switching devices will produce serious common-mode conduction interference. In order to predict common-mode conducted interference. The subway vehicle inverter system with rated power of 190 kW is taken as the research object, and the interference source and interference path are analyzed. The high-frequency parameters of each component of the common mode conducted interference path of the subway vehicle inverter system are extracted by finite element simulation software Ansys Q3D and impedance analyzer. Then, the full circuit model of common mode conducted interference of metro vehicle inverter system is built, and the simulation software Ansys Simplorer is used to simulate and analyze the full circuit model of the common mode conducted interference of metro vehicle inverter system. Finally, the simulation prediction results are compared with the field test ones. In the frequency range of 150 kHz to 3 MHz, the simulation prediction results are basically consistent with the field test ones. In the frequency range of 3 MHz to 30 MHz, the error between the simulation prediction results and the field test ones is about 8 dB due to the influence of grid-connected experiment, bench wiring, test probe transfer impedance and other factors. This proves that the modeling and analysis of the whole circuit model designed in this paper are correct. The research results have a good reference value for the prediction of common mode conducted interference level of subway vehicle inverter system.

Keywords: inverter system; common mode; electromagnetic interference; full circuit equivalent

~~~~~  
(上接第 95 页)

## Study on Laser Cladding Repair of Cast Steel Surface Defect for Traction Pin

LIU Fang, GUO Ziming, SHANG Chun, LU Xing

(School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** The austenitic stainless steel was coated on 25 steel traction pin by laser cladding technology, and the microstructure and structure of the coating were analyzed and characterized by optical microscopy, scanning and transmission electron microscopy and X-ray diffractometer. The hardness and wear properties of the coating were tested by microhardness and wear testers. The results show that the cladding layer of the austenitic stainless steel is composed of equiaxed, dendrite and planar crystals, and the heat affected zone is composed of martensite and sorbite. The inner dendrite of the cladding layer is  $\gamma$  phase, and the inter dendrite is composed of  $\gamma$  phase and carbide  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ . The microhardness of the cladding layer, heat affected zone and matrix are 310  $\text{HV}_{0.1}$ , 280  $\text{HV}_{0.1}$  and 170  $\text{HV}_{0.1}$  respectively. The wear test indicates that the matrix of the steel is adhesive wear and abrasive wear, and the cladding layer is abrasive wear. The wear resistance of the cladding layer is twice that of the 25 steel matrix after 1 h wear test.

**Keywords:** laser cladding; cast steel; microstructure; wear property