

研
究
开
发

一种磁悬浮列车牵引逆变器的研制

杨 光, 李 华, 杨进峰, 张 祥

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



摘 要: 介绍了 TEP-15HI02 型磁悬浮列车 IGBT 牵引逆变器的主要技术参数、主电路原理及总体结构, 简述了该逆变器的技术特点, 通过组合试验及运行考核表明该逆变器的设计能够满足磁悬浮列车应用需求。

关键词: IGBT; 牵引逆变器; 磁悬浮列车; 交流传动; 主电路

中图分类号: U292.91+7; U264.3+72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)02-0028-03

作者简介: 杨 光 (1983-), 男, 工程师, 现从事逆变器的研究开发工作。

Research and Design of Traction Inverter for Maglev Train

YANG Guang, LI Hua, YANG Jin-feng, ZHANG Xiang

(Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Main parameters, power circuit and general structure of IGBT traction inverter employed in TEP-15HI02-type maglev train were introduced. The technical features were described briefly. The performance of the inverter during testing and trail operation satisfied the demand of maglev traction.

Key words: IGBT; traction inverter; maglev train; AC drive; power circuit

0 引言

磁悬浮列车是一种新型的轨道交通装备, 它利用电磁力使列车在轨道上悬浮, 通过直线电机推动其前进, 避免了传统列车轮轨系统所引起的振动, 因此噪声低、行驶平稳, 乘坐舒适。列车在运行时“抱轨”运行, 不会发生脱轨事故, 而且由于其牵引力不受轮轨间的粘着系数影响, 其爬坡能力强, 转弯半径小, 是安全、快捷、环保的绿色轨道交通工具, 在各种交通方式中具有独特的优势。

牵引逆变器作为列车整个交流传动系统的重要组成部分, 其基本功能是牵引工况时把直流电转换成频率和幅值都可调的三相交流电, 为直线牵引电机供电^[1-3]; 制动工况时通过再生制动将能量反馈回电网。本文介绍用于某磁悬浮试验车的 TEP-15HI02 型 IGBT 牵引逆变器。

1 牵引逆变器主电路及主要技术参数

主要技术参数如下:

标称输入电压	DC 1 500 V
输入电压范围	DC 1 000~1 800 V

标称输出容量	900 kVA
最大输出容量	1 300 kVA
输出电压	三相 0~1 170 V
开关频率	500 Hz
额定输出电流	440 A
最大输出电流	700 A
输出频率	0~120 Hz
控制方式	直接力矩控制
冷却方式	热管强迫风冷
防护等级	IP54
质量	385 kg

该列车供电电压为 DC 1 500 V, 每辆车配置 1 台逆变器, 驱动该车的 10 台直线牵引电机, 牵引电机的电气连接方式为 5 串 2 并, 每台电机的最大容量为 130 kVA, 逆变器总的输出容量为 1 300 kVA。

牵引逆变器主电路如图 1 所示, 主电路采用二电平直交电路结构, DC 1 500 V 电压经高压电器柜接入牵引逆变器。VH1 用于检测网压, LH1 用于检测输入电流, R4~R5 为固定放电电阻, Rch 为过压斩波电阻, VH2 用于检测电容器电压, C1~C2 为支撑电容器, LH2~LH4 分别检测斩波电流和逆变器输出电流。

收稿日期: 2011-04-11; 收修改稿日期: 2011-05-23

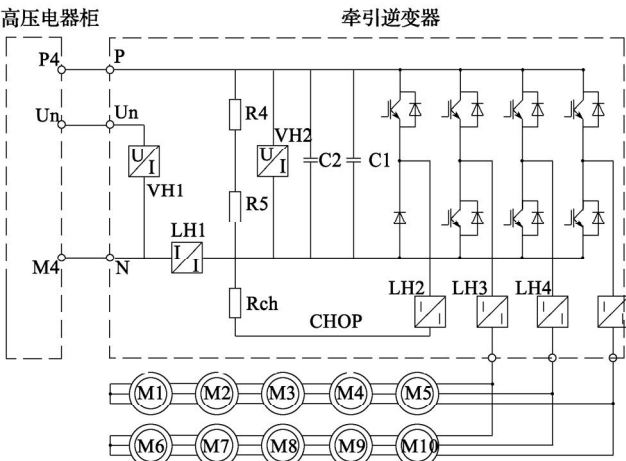


图 1 逆变器主电路图

2 牵引逆变器的总体结构

如图2所示，逆变器采用吊装方式悬挂于车底，其外形尺寸为1 450 mm×900 mm×550 mm (长×宽×高)，主电路对外接口、辅助电源与控制信号插头布置在柜体右侧，在柜体的前后两面开有柜门，方便对逆变器进行调试和检修。逆变器采用热管强迫风冷，在柜体底部布置有冷却风机，对逆变器模块和斩波电阻进行冷却，冷空气由柜体顶部吸入后由柜体底部排出。

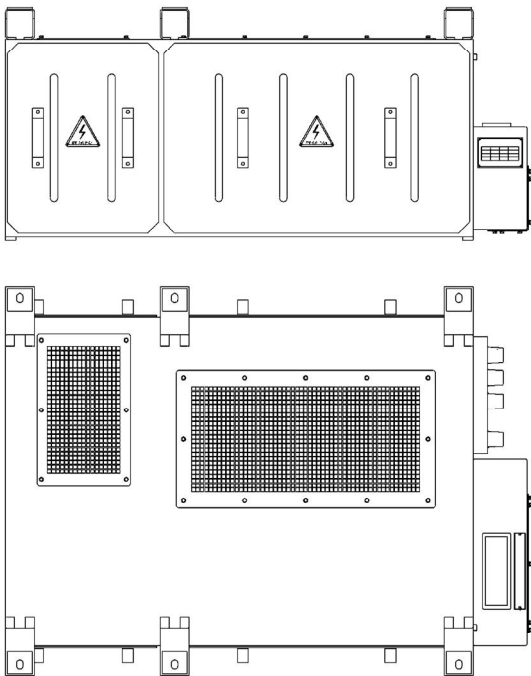


图 2 牵引逆变器结构图

3 逆变器的技术特点

TEP-15HI02型逆变器为模块化结构,包含有变流器模块、支撑电容器、传动控制单元(DCU)、斩波电阻、电压电流传感器、冷却风机等部件。

3.1 变流器模块

变流器模块集成了逆变器的主要功能单元，包含控制组件和元件组件两大部分。它可方便地从逆变器

的正面抽出，确保在车下极有限的空间内能够方便地对逆变器进行维护。模块上集成了8个IGBT元件、热管散热器、门极驱动单元、驱动电源、脉冲分配单元、低感母排等部件。

IGBT 在快速关断过程中会产生很高的尖峰电压，所以在变流器模块的设计中应设法对其进行抑制。尖峰电压的大小与 di/dt 和电路中的杂散电感 L_s 有关，如减小元件关断时的 di/dt 将增大元件的关断损耗，不仅降低了逆变器效率，而且增加了模块的散热负担。为此，减小主电路的杂散电感成为克服尖峰电压的最佳方法。该变流器模块中IGBT元件之间及与支撑电容的联接采用了低电感母排(Busbar)技术，极大地减少了线路上的杂散电感，省去了吸收电路，使电路更为简洁可靠。

脉冲分配单元与门极驱动单元间的信号传输通过光纤实现，不仅解决了高压隔离问题，而且提高了变流器模块的抗干扰性能。同时作为最底层的控制单元具有触发脉冲级保护和驱动级保护功能，它们可在足够短的时间内判断IGBT的异常情况并及时进行处理，确保了逆变器在负载异常等极端情况下的安全性。

3.2 逆变器的冷却

逆变器的冷却方式为热管散热器强迫风冷。与普通的铝散热器相比，热管散热器的散热效率更高，逆变器的单位体积功率可以做得更大；与水冷散热器相比，省去了复杂的水冷却系统，减小了逆变器的体积，提高了逆变器的可靠性。热管的工作原理基于液体汽化和液化所吸收和释放的热量，在蒸发端液态介质蒸发吸收热量，由于管内为真空状态，其沸点比标准大气压下的液体沸点低，蒸发更加迅速，蒸汽流到达冷凝端后液化放出热量，凝结的液体在吸液芯的作用下返回蒸发端，形成一个液体相变循环进而转移热量。热管以水作为冷媒，对环境无污染，而且具有高传热效率、等温性能好和启动温差低的优点^[2]。

3.3 逆变器的传动控制

传动控制单元(DCU)集成在一个标准机箱内，控制方法为直接力矩控制，DCU的供电电源为DC 110 V。传动控制单元具有过压、欠压、过流、过载、短路、接地、缺相、过热等保护功能。故障发生时，逆变器的控制单元能迅速作出反应，对故障进行处理或隔离，确保故障不会进一步扩大或失控。故障信息可通过网络识别，与列车级控制系统通信。控制箱置于屏屏蔽结构的逆变器柜内，通过逆变器对外电联接器实现与列车电气控制的连接及通信。

4 关键器件的选型

4.1 IGBT 元件选型

IGBT 是逆变器的核心器件，既要对其充分使用，也要保证其工作的可靠性，所以选择合适型号的IGBT

至关重要。

元件电压定额按下式计算：

$$V_{CE} = (U_{dc \max} \times K_1 + \Delta U) \times K_2 = (2000 \times 1.15 + 500) \times 1.1 = 3\,080 \text{ (V)} \quad (1)$$

式中： $U_{dc \max}$ ——直流环节最高电压； K ——电压裕度系数； K_2 ——安全系数； ΔU ——开关过电压。

元件电流定额按如下式计算：

$$I_C = I_{AC} \times \sqrt{2} \times K_3 = 440 \times 1.414 \times 1.3 = 809 \text{ (A)} \quad (2)$$

式中： I_{AC} ——逆变器输出电流(有效值)； K_3 ——电流尖峰系数。

按逆变器最大输出电流计算时：

$$I_C = 700 \times 1.414 \times 1.3 = 1\,287 \text{ (A)}$$

通过以上对IGBT元件电压和电流定额计算,选定3 300 V/1 200 A的IGBT元件。

4.2 门极驱动功率计算

IGBT是电压驱动型器件,平均驱动功率相对较低,但对于大功率IGBT则需重点考虑驱动器的峰值电流输出能力。

IGBT栅极驱动功率受到驱动电压即开通 $V_{ge(on)}$ 和关断 $V_{ge(off)}$ 电压、栅极总电荷 Q_g 和开关频率 f 的影响^[4]。

栅极驱动电源平均功率计算参见式(3)：

$$P_{av} = (V_{ge(on)} + V_{ge(off)}) \times Q_g \times f = 30 \times 22 \times 10^{-6} \times 500 = 0.33 \text{ (W)} \quad (3)$$

栅极峰值电流参见式(4)：

$$I_{GP} = \frac{V_{ge(on)} - [-V_{ge(off)}]}{R_g} = \frac{V_{ge(on)} + V_{ge(off)}}{R_g} = \frac{30}{0.91} = 32.9 \text{ (A)} \quad (4)$$

式中： R_g ——驱动内部和外部驱动电阻的总和。

4.3 支撑电容器的选用

逆变器工作时会产生开关频率下的纹波电流,这些纹波电流的大小与逆变器的总功率相关。IGBT在开关过程中产生的 di/dt 可感应出很高的尖峰电压,需要降低直流电路的电感。因此,支撑电容器应具有足够的容量和较低的寄生电感。

支撑电容的容量可按式(5)计算：

$$C = \frac{10P}{\omega U_d^2} = \frac{10 \times 550 \times 10^3}{2 \times 3.14 \times 50 \times 1500^2} = 7.77 \text{ (mF)} \quad (5)$$

式中： P ——额定输出功率； ω ——频率系数； U ——直流电压。

考虑到直线电机的功率因数较低,支撑电容值取8.6 mF,选用2个4.3 mF电容器并联,标称工作电压为2 000 V的低感薄膜电力电容器。

4.4 固定放电电阻

逆变器的主电路设置了固定放电回路,当主电路因故无法快速放电时,电容器的能量可通过固定放电回路消耗掉。为确保操作人员的安全,规定逆变器在停机15 min内,直流环节电压必须降至安全工作电压以下(36 V),计算方法参见式(6)：

$$t = \tau \times \ln \frac{U_d}{U_c} = R \times C \times \ln \frac{U_d}{U_c} = R \times 8.6 \times 10^{-3} \times \ln \frac{2000}{36} \leq 900 \text{ (s)} \quad (6)$$

通过式(6)得 $R \leq 26 \text{ k}\Omega$,由此确定选用2个10 k Ω 的功率电阻串联做固定放电电阻。

5 逆变器的试验

逆变器试验是为了验证产品能否满足技术规范的全部要求所进行的试验。它是新产品鉴定中必不可少的一个环节,只有通过全面的试验验证后产品才能投入应用。实物图如图3。

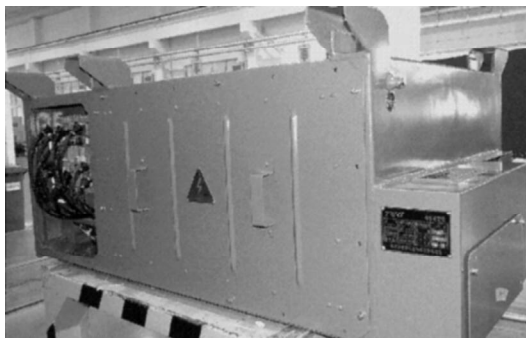


图3 牵引逆变器实物图

逆变器试验接线如图4所示,变压器二次侧绕组输出连续可调的交流电,经全波整流后接入高压柜,高压柜的输出端直接接入逆变器的直流输入端,U、V、W为逆变器的输出端子,与作为负载的直线牵引电机相联。

图4 逆变器试验接线图

通过地面试验,验证了该牵引逆变器在输入直流1 500 V下能够稳定输出440 A电流,在规定时间内短时输出峰值电流可达到700 A。试验全面考核了牵引逆变器的各项性能,对逆变器的能力、可靠性与稳定性进行了有效的评估。

6 结语

该磁悬浮列车已经在国家中低速磁悬浮交通试验示范线上成功运行,TEP-15HI02型IGBT牵引逆变器运行情况良好,表明该逆变器完全满足磁悬浮列车交流传动系统的要求。

参考文献：

- [1] 忻力. 兆瓦级IGBT牵引逆变器的开发[J]. 机车电传动, 2000(5).
- [2] 翁星方. 北京地铁国产化列车IGBT牵引逆变器[J]. 机车电传动, 2008(4).
- [3] 黄济荣. 电力牵引交流传动与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [4] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. IGBT和IPM及其应用电路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.