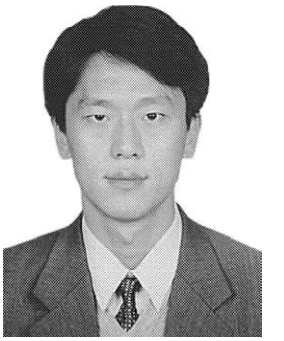
DOI:10.13890/j.issn.1000-128x.2011.03.028

城市轨道车辆

简统化地铁车辆IGBT牵引逆变器

翁星方，忻 力，胡家喜，陈燕平，邹档兵

（株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心，湖南 株洲 412001）



作者简介：翁星方（1975-），男，硕士，高级工程师，现从事IGBT牵引变流器的设计开发工作。

摘 要：详细介绍了具有完全自主知识产权的简统化地铁车辆IGBT牵引逆变器的主电路、变流器模块、牵引控制单元（DCU）以及总体设计，阐述了该型牵引逆变器的技术特点。通过实际装车考核，表明该简统化地铁车辆IGBT牵引逆变器的设计完全能够满足目前地铁交流牵引传动系统的要求。

关键词：地铁车辆；IGBT；逆变器；简统化

中图分类号：TM464；U231 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-128X(2010)03-0044-05

The Simplification of IGBT Traction Inverter for Metro Vehicle

WENG Xing-fang, XIN Li, HU Jia-xi, CHEN Yan-ping, ZOU Dang-bing

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

Abstract: Power circuit, converter module, DCU and general design of the simplification IGBT traction inverter with completely independent intellectual property rights for metro vehicle were introduced. The technical features were also described. The design of the simplification IGBT traction inverter was proved satisfying the demand of metro traction.

Key words: metro vehicle; IGBT; inverter; simplification

0 引言

随着我国城市轨道交通的快速发展，对城市轨道交通牵引装备的需求也越来越大。目前，作为城市轨道交通牵引装备核心部件的牵引逆变器，由于产品差异，存在着吊装方式不一致，成熟技术不易统一，产品质量把控困难，投入大，研发和生产成本难以下降等诸多弊病。因此，设计满足不同区域、不同客户需求的地铁IGBT牵引逆变器具有重要的工程推广意义。

1 简统化思想

牵引逆变器是轨道交通车辆的核心部件，它的性能好坏直接影响到车辆的可靠运行。从设计角度考虑，希望有一个统一的平台，所有的轨道交通牵引逆变器都以这个平台为基础进行开发，将不同的应用进行简统化设计，比如不同的电压等级、不同的应用区域等；所生产的牵引逆变器都有统一的结构方式、统一的对外接口、统一的内部布置，所不同的只是关键的器件的选型，而这些器件的接口要么保持一致，要么只做局部细微调整。这样做可以减轻设计部门研发压力，提高研发产出率，以应对城市轨道交通线路多、每条线路需求不大的特点。

目前，世界知名的轨道交通装备制造商（如Siemens、Alstom等）为了提高产品互换性和通用性，降低开发、生产及采购成本，方便用户的维护保养等做了大量卓有成效的通用化、标准化设计研究工作，并已在各自的牵引逆变器产品中得以实施。

简统化的原则就是按照标准化、系列化、通用化的要求，借鉴国内外的成功经验，将地铁IGBT牵引逆变器产品的品种简化，设计并生产系列化的牵引逆变器。实现地铁IGBT牵引逆变器简统化的一个重要基础就是其中零部件的模块化，以及这些模块功能及接口的标准化、规范化。

根据简统化思想，地铁IGBT牵引逆变器可拆分为逆变器柜体、DCU机箱、变流器模块、功率电阻等模块单元，这些模块内的零部件按照单元件、组合件、标准件或功能块的要求进行组装，并且使这些模块的功能和接口标准化、规范化。

收稿日期：2010-08-15；收修改稿日期：2011-04-14

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　主电路的简统化

目前，地铁IGBT牵引逆变器常用的典型主电路有以下2种：一种是采用2个变流器模块驱动4台牵引电机的架控方式的主电路，如图1所示；另外一种是车控方式的主电路，如图2所示。

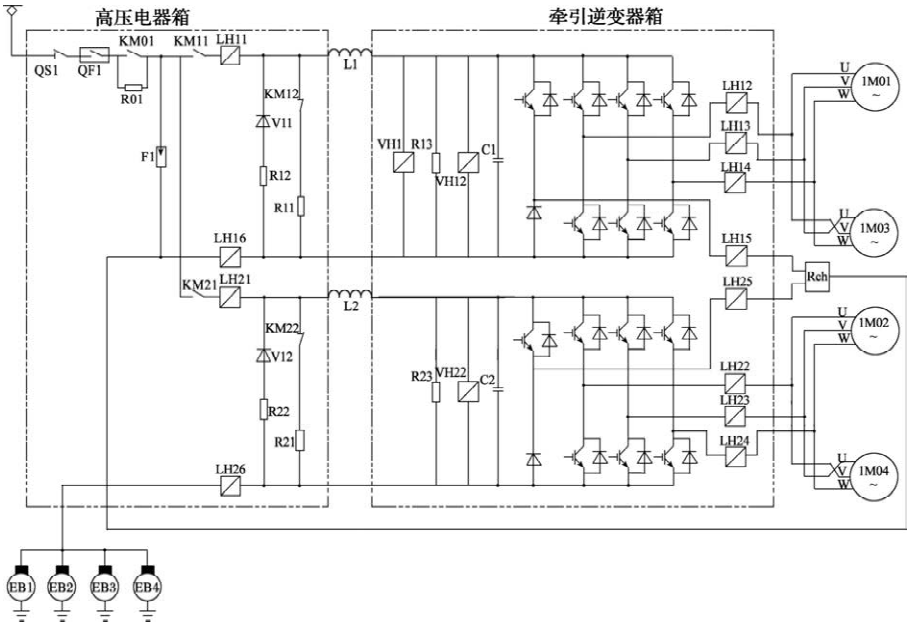


图 1　双模块架控主电路

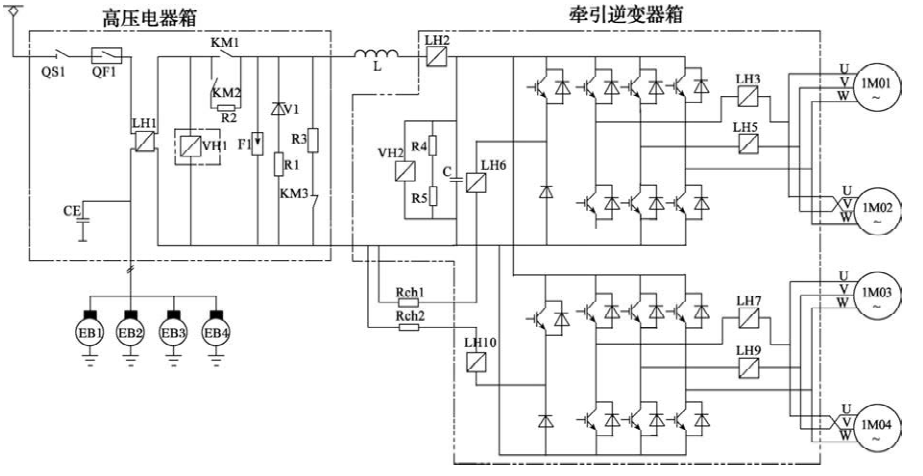


图 2　双模块车控主电路

图1中左侧虚线框内部分为高压电器箱，包括了QS1、QF1、KM01等高压电器，其中QF1用于主电路的故障保护；KM11、KM21、R01组成充电电路；KM12、KM22、R11、R21组成快速放电电路；F1、V11、V21、R12、R22用于当主电路发生故障时，L1、L2等储存能量的释放；LH11、LH16、LH21、LH26用于主电路接地检测。

图1中右侧虚线框内部分为牵引逆变器，不包括充放电等高压电路。柜内装有2个变流器模块，每个模块驱动同一车辆不同转向架的1、3位和2、4位2台并联的异步牵引电机。其优点是当其中一个变流器模块故障时，可以将其切除，另一个变流器模块仍可继续工作，该车动力只损失一半，并且2个变流器单元分开控制，有利于提高车辆的粘着利用。其缺点是增加了许多部件（尤其是接触器），导致系统可靠性降低，体积和成本增加。

图1中R13、R23组成固定放电电路；LH11、LH16、LH21、LH26用于检测中间直流环节电流；LH12～LH14、LH22～LH24用于检测输出电流；LH15、LH25用于检测制动电流；VH1用于检测网压；VH12、VH22用于检测支撑电容电压。

图2中左侧虚线框内部分为高压电器箱，包括了QS1、QF1、LH1、F1、KM01等高压电器，其中QF1用于主电路的故障保护；LH1用于主电路接地检测；KM2、R2组成充电电路；KM3、R3组成快速放电电路；F1、V1、R1用于当主电路发生故障时，L等储存能量的释放。

图2中右侧虚线框内部分为牵引逆变器，不包括充放电等高压电路，采用2个模块驱动4台牵引电机的车控方式，其优点是电路简单，节省成本，由于接触器数量减少，有利于提高系统可靠性。缺点是不利于车辆的粘着利用，当其中一个变流器单元故障时，无法单独隔离，只能将整个变流器切除，该车动力全部损失。

图2中R4、R5组成固定放电电路；LH2用于检测中间直流环节电流；LH3～LH5、LH7～LH9用于检测输出电流；LH6、LH10用于检测制动电流；VH1用于检测网压；VH2用于检测支撑电容电压。

通过对比图1和图2可知，主电路都是采用二电平电压型直交逆变电路，因此逆变器的主电路可以简统化，即每辆动车上装有1台高压电器箱和1台牵引逆变器，每个逆变器柜内都装有2个变流器模块，每个变流器模块驱动2台牵引电机。通过改变逆变器内部变流器模块直流端的连线方式，可以方便地实现主电路的车控方式或架控方式。

3　变流器模块的简统化设计

由于城市轨道交通牵引系统的供电制式不同，导致牵引逆变器所选用的元器件也存在着差异。目前国内城市轨道交通牵引系统的供电制式主要有2种：一种采用DC 750 V供电电压制式，允许电压波动范围为

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

DC 500～900 V,第三轨受流;另一种采用DC 1 500 V供电电压制式,允许电压波动范围为DC 1 000～1 800 V,架空接触网受电弓受流。

由于供电电压的不同,变流器模块选用的IGBT元件也不相同,一般地铁牵引电机的额定功率为200 kW左右。变流器模块的额定输出电流可以通过式(1)进行计算:

$$I_o = 2\times\frac{P}{\sqrt{3}\cdot U_1\cdot\eta_1\cdot\eta_2} \tag{1}$$

式中:P——电机额定功率;U_1——电机电压;η_1——功率因数;η_2——效率。

因此根据式(1)可计算得出在供电电压为DC 1 500 V和DC 750 V的2种网压下变流器模块额定输出电流。IGBT元件的电压定额和电流定额可以通过以下公式进行计算:

$$U_m = (k_1\times U_{d\max} + U_{sp})\times k_2 \tag{2}$$

式中:k_1——过电压系数;k_2——安全系数;$U_{d\max}$——额定直流电压最大值;U_{sp}——关断即将结束时的尖峰电压。

$$I_m = \sqrt{2}\cdot I_o\cdot\alpha_1\cdot\alpha_2\cdot\alpha_3 \tag{3}$$

式中:I_o——额定工作电流;α_1——电流尖峰系数;α_2——温度降额系数;α_3——过载系数。

通过上述的计算可知,在供电电压制式为DC 750 V时,变流器模块通常选用1 700 V/1 600 A的IGBT元件;在供电电压制式为DC 1 500 V时,变流器模块通常选用3 300 V/800 A的IGBT元件。

由于1 700 V/1 600 A的IGBT元件与3 300 V/800 A的IGBT元件安装尺寸及外形都一样,因此可以对这2种IGBT元件的变流器模块进行简统化设计。

对2种IGBT元件的功率损耗及器件结温进行核算,按最大的功率损耗进行散热器设计(兼顾1 700 V/1 600 A的IGBT元件与3 300 V/800 A的IGBT元件),因此设计出重力式热管散热器作为简统化变流器模块的散热器,利用车辆走行风进行冷却。热管的传热原理是基于液体的汽化和气体的液化所吸收和释放的能量,它具有很高的导热能力和优良的热响应性,并且无功耗、无噪声,使用维护也比较方便,基本可以实现免维护,是目前被广泛使用的具有高导热性能的传热元件。

为了遵循模块化设计的思想,把热管散热器、低感复合母排、支撑电容、三相逆变桥臂和斩波桥臂、门极驱动单元、脉冲分配单元等都集成在变流器模块里,最大限度地减少外部接线,集成度高,极大提高了模块的可用性与可维护性。

为了实现牵引逆变器的简统化,把不同的变流器模块的外形、安装方式及对外接口均进行了简统化设计,使得模块对外接口(包括机械接口与电气接口)完全一致。如图3所示,母排1为模块主电路直流输入接线,母排2为模块主电路交流输出接线,插座1～插座3用于控制信号接线。变流器模块通过模块安装孔,采用14个M10螺栓牢固地安装在牵引逆变器柜体上。

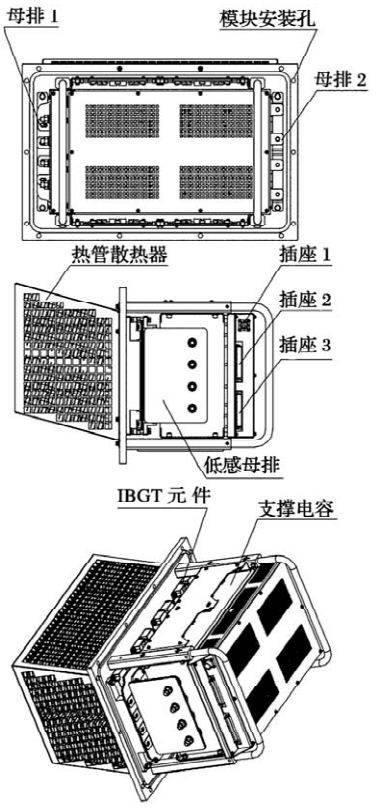


图3 变流器模块外形图

4 其他部件的简统化设计

4.1 牵引控制单元

牵引控制单元(Driving Control Unit,简称DCU)是牵引逆变器另一核心部件,放置于牵引逆变器的中间隔舱,主要功能是根据司机指令完成对牵引逆变器暨牵引电机的实时控制、粘着利用控制,同时具备完整的故障保护功能、故障诊断功能和轻微故障的自复位功能。它包含硬件和软件两部分,硬件是软件的依托,主要负责对输入/输出信号的转换和整定,为软件提供可运行和发挥的环境;软件是控制的思想,它通过控制开关元件的通断来实现控制功能。

为了实现牵引逆变器的简统化,DCU机箱也进行了简统化设计,采用标准的6U插件箱,控制信号均从各插件的前面板输入/输出等。在控制软件方面也进行了相应的模块化设计,具有以下特点:

① 各软件模块相对独立,功能单一,可混合编写,也可独立编写,便于实现多人并行开发,缩短开发周期,降低开发成本;

② 开发出的软件模块可在不同的应用程序中多次使用,从而实现减少重复劳动、提高开发效率的目标;

③ 测试、更新工作以单个软件模块为单位进行,不会影响其他的软件模块;

④ 对特定的系统,可以编写专用软件模块,让非专业人员进行系统集成,实现技术保密。

4.2 传感器

由于不同地区的供电制式不同,牵引逆变器中所采用的电压传感器、电流传感器也不尽相同。

电压传感器一般选用电压等级为1 000 V(DC 750 V供电制式)和2 000 V(DC 1 500 V供电制式)的电压传感器,这2种电压等级的电压传感器外形和安装尺寸都一样。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过式(1)计算可得牵引逆变器的输出电流，因此选用电流等级为1 000 A的电流传感器能够满足2种供电制式下的要求。

4.3　功率电阻

从主电路图中可以看出，牵引逆变器中的功率电阻主要是指固定放电电阻。由于不同地区的供电制式不同，因此牵引逆变器中所采用的固定放电电阻也不尽相同。

一般技术规定，固定放电电阻必须在5 min中内将支撑电容电压降到人体安全电压以下，即固定放电电阻阻值须满足式(4)：

$$U_{\mathrm{dp}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{t}{R \cdot C_{\mathrm{d}}}} \leq U_{\mathrm{safe}} = 36\ \mathrm{V} \tag{4}$$

由式(4)可推算出固定放电电阻阻值：

$$R \leq \frac{t}{C_{\mathrm{d}} \cdot \ln \dfrac{U_{\mathrm{dp}}}{U_{\mathrm{safe}}}} \tag{5}$$

电阻消耗的能量：

$$Q = \frac{U_{\mathrm{dp}}^2 C}{2} \tag{6}$$

电阻消耗的平均功率：

$$P = \frac{Q}{T} \tag{7}$$

电阻的冲击功率：

$$\hat{P} = \frac{U_{\mathrm{dp}}^2}{R} \tag{8}$$

式中：t——放电时间，s；R——固定放电电阻，Ω；U_{dp}——支撑电容上最大直流峰值电压，V；U_{safe}——人体安全电压，V；C_{d}——支撑电容，F；Q——电阻消耗能量，J；P——电阻消耗的平均功率，W；$\hat{P}$——电阻的冲击功率，W。

因此，在选用固定放电电阻时，应综合考虑，选择关键参数满足以下要求的电阻：

$$\begin{cases} \text{电阻} \leqslant R \\ \text{持续功率} \geqslant P \\ \text{冲击功率} \geqslant \hat{P} \end{cases}$$

通过上述计算选用合适的固定放电电阻，设计采用带铝散热板的功率电阻，并且要求电阻厂商把2种功率电阻(在DC 1 500 V和DV 750 V 2种供电制式下)安装尺寸及外形设计成一样。

通过上述分析，在DC 1 500 V和DC 750 V 2种供电制式下，电压传感器、电流传感器以及功率电阻其外形基本能够保持一致，因此能够实现牵引逆变器的简统化设计。

5　牵引逆变器柜体的简统化设计

为了实现牵引逆变器的简统化，以满足不同地区、不同用户的不同需求，总结以往成熟产品的设计经验，将牵引逆变器的外形尺寸最终确定为2 400 mm×883 mm×600 mm($L \times W \times H$)，其外形设计如图4所示。

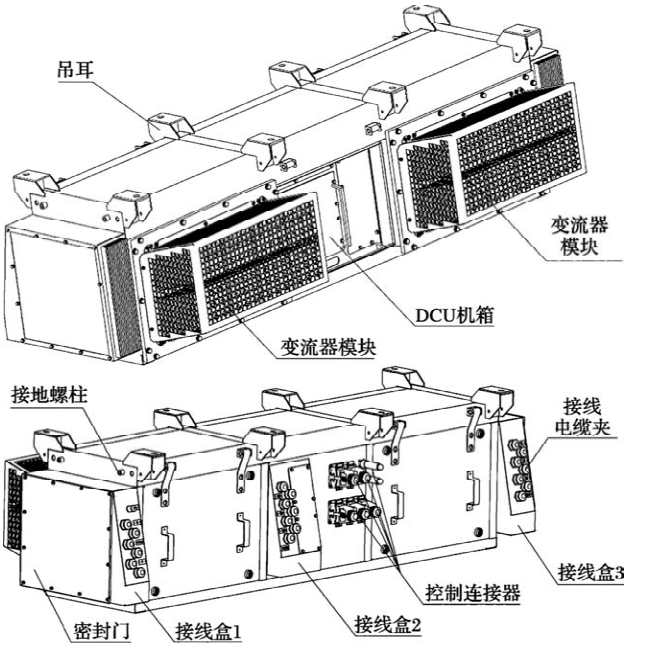


图4　牵引逆变器

变流器模块设计为抽屉式结构，便于在牵引逆变器柜体上进行安装、检修及维护。牵引逆变器设有8个吊耳，每个吊耳通过M16以上的螺栓来保证其安全吊装于车体底部。牵引逆变器柜体高度600 mm，标准吊耳的高度60 mm，通过调节吊耳的高度，可以满足车体底部不同安装空间的要求。

如图4所示，为了使得柜体的重心与其几何重心基本一致，有利于车体底部设备的整体布局，设计整个牵引逆变器柜体时用4块隔板将其分成3个隔舱，其中，中间隔舱相对密闭，用于放置DCU机箱，能够有效防止电磁干扰对控制系统的影响。左右2个隔舱用于放置变流器模块。在柜体一侧设计3个主电路接线盒，其中，接线盒1用于主电路直流输入电缆接线；接线盒2和接线盒3均用于主电路交流输出电缆的接线。牵引逆变器所有对外控制连接器均采用密封结构；3个隔舱采用门锁结构设计，每个隔舱都设计一个密封门，不仅防水防尘，而且使得部件的安装和维护、拆卸更加方便；主电路的输入输出电缆通过电缆夹由铜接头压接，因此使得整柜密封能够满足车底设备防护等级IP54的要求。此外，牵引逆变器还在柜体四周对称设计4个接地螺柱，以保证柜体可靠接地。

6　结语

通过简统化设计思路自主创新开发出来的牵引逆变器，不但能够满足城市轨道交通车辆的特殊工作环境，具有安装维护方便、结构强度高、内部结构紧凑、外表美观精致等特点，而且能够在不重新设计柜体的

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

条件下通过改变接线方式、更换变流器模块及DCU机箱就能方便实现车控和架控的互换，同时也能够满足在不同供电制式下的应用，极大地缩短了牵引逆变器的设计开发周期。

经过简统化设计的地铁IGBT牵引逆变器现已经批量应用于上海地铁1号线、沈阳地铁2号线、北京地铁房山线、深圳地铁5号线、重庆地铁6号线等国产化地铁项目。从现场反馈的情况来看，该牵引逆变器的总体运行情况良好，完全能够满足地铁车辆交流电传动系统的要求，并且在轨道交通车辆牵引系统行业可以满足客户多样化的需求，打破了外国公司对国内城市轨道交通牵引装备的技术垄断，填补了国内空白。

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] 荣智林. TGN10型地铁车辆用DC1500V IGBT牵引逆变器 [J]. 机车电传动，2004 (4).

[3] 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).

[4] 刘海涛. 地铁车辆用DC1500V IGBT牵引逆变器 [J]. 机车电传动，2008 (5).

（上接第22页）

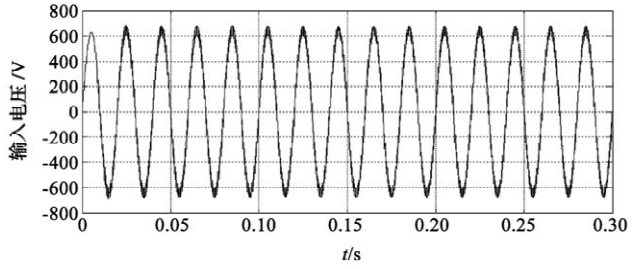


图 4　辅助变流器输入电压波形

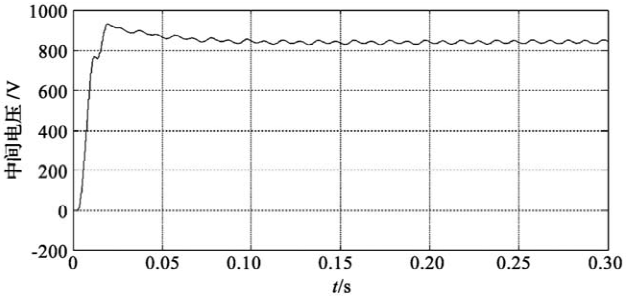


图 5　辅助变流器中间电压波形

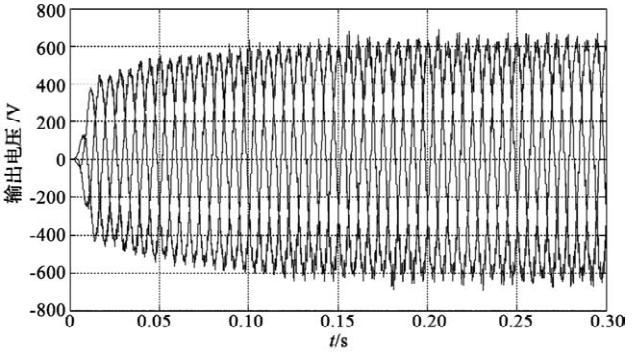


图 6　辅助变流器输出电压波形

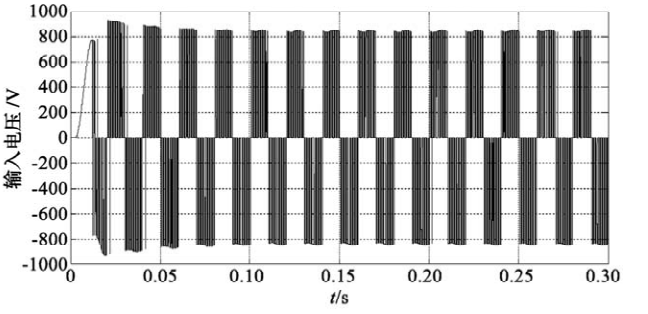


图 7　整流器输入 PWM 波

4　结语

① 本文分析了辅助变流器子系统在整个HXD1C机车系统中所处位置和所起作用，为分析和解决辅助变流器在整车调试过程中碰到的系统问题提供一个系统平台。②详细阐述了主电路逻辑控制过程。为了更好地研究HXD1C辅助变流器的电气性能，详细地计算了该电器的阻抗值，为设计改善提供理论依据。同时，对输入电感的特性和电感在主电路中所起作用进行了较深入的分析，并分析了中间电路中各电路器件的作用。③提出了一种根据开关频率估算IGBT上电压降的数学方法。最后，对主电路进行仿真，并且给出了仿真波形。

参考文献：

[1] 陈　坚. 电力电子学 [M]. 北京：高等教育出版社，2004.

[2] 邱关源. 电路 [M]. 北京：高等教育出版社，1999.

[3] 刘长清. 电力机车四象限辅助变流器的研制 [J]. 电力机车与城轨车辆，2003，26(6)：18-20.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net