

节能技术及应用

牵引电力电子变压器系统关键技术研究

陈涛, 苏亮亮, 张志学, 漆宇, 刘红强, 冯钊赞

(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 随着半导体及磁性材料技术的发展, 电力电子变压器近年来成为研究热点, 相较于传统工频变压器, 它具有功率密度高、效率高、高压侧电能全控、保护更加迅速等优点, 是“双碳”背景下电能变换的重要技术发展方向。在牵引领域, 国外较早开展牵引电力电子变压器的研究, 但主要针对15 kV/16.7 Hz牵引网制式。在国内牵引网制式为25 kV/50 Hz的条件下, 电力电子变压器的应用面临紧凑空间要求与更高工作电压的矛盾, 导致高压主电路拓扑选型、绝缘系统小型化、冷却系统绝缘安全等一系列难题。目前世界上暂无25 kV/50 Hz牵引电力电子变压器研制情况的报道。文章针对适用于我国牵引网制式的牵引电力电子变压器系统, 开展了主电路拓扑及控制、高压绝缘设计、冷却设计等关键技术研究, 分析并采用了基于3 300 V 硅基半导体器件的中性点箝位(Neutral point clamped, NPC)三电平高压高频DC-DC隔离型主电路及双边同步调制策略, 实现牵引制动能量迅速切换; 提出基于复合材料的绝缘系统设计方法, 实现了主回路对地的高绝缘耐压; 提出泵驱相变蒸发冷却关键技术, 实现了变压器和变流器一体化冷却, 并完成了电力电子变压器单支路样机及工程化整机的研制及装车试验, 试验结果表明了设计方法的有效性。

关键词: 牵引电力电子变压器; 三电平; 复合绝缘; 相变冷却; 牵引网制式

中图分类号: U264.3*6

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2022)03-0130-08

Research on key technologies for power electronic traction transformer

CHEN Tao, SU Liangliang, ZHANG Zhixue, QI Yu, LIU Hongqiang, FENG Zhaozan

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: With the technological development of semiconductor and magnetic materials, the power electronic transformer has become a research hotspot in recent years. Compared with the traditional power frequency transformer, it has the advantages of high power density and high efficiency, full control of electric energy at the high-voltage side, and rapid protection, representing an important technical development trend of electric energy conversion in the context of carbon peaking and carbon neutrality. In the field of traction, the early researches on the power electronic traction transformer abroad mainly focused on the 15 kV/16.7 Hz traction network system, while the domestic traction network system works at 25 kV/50 Hz. The domestic application of the power electronic transformer faces the contradiction between the compact space requirements and a higher working voltage, bringing a series of difficulties such as topology selection of high-voltage main circuit, miniaturization of insulation system, insulation safety of cooling system. However, the reports presenting the development status on the 25 kV/50 Hz power electronic traction transformer are absent worldwide. Targeting the power electronic traction transformer system suitable for the China's traction network system, the key technologies such as main circuit topology and control, high-voltage insulation design, cooling design was studied. In the current study, the neutral point clamped (NPC) three-level high-voltage high-frequency DC-DC isolated main circuit based on 3 300 V Si-based semiconductor devices and bilateral synchronous modulation strategy were analyzed and applied to realize rapid switching of traction/braking energy; The design approach of insulation

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-05-01

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFB1200901)

通信作者: 陈涛 (1983—), 男, 高级工程师, 长期从事牵引电力电子变压器研发工作; E-mail: chentaol@csrzc.com

system based on composite materials was proposed to realize the high insulation and withstand voltage of the main circuit to the ground; The key technology of pump driven phase change evaporative cooling was proposed to realize the transformer-converter integrated cooling. In addition, the development and on-board test were completed for the single branch prototype and engineering machine of the power electronic transformer. The test results demonstrate the effectiveness of the design approach.

Keywords: power electronic traction transformer (PETT); three-level; composite insulation; phase change cooling; traction network system

0 引言

基于电力电子和交流电机调速技术的电力牵引技术是电力机车和高速动车组列车的核心技术之一。电力机车及动车组上的电力牵引系统一般由受电弓、单相工频牵引主变压器、牵引变流器、牵引电机等部分组成。受电弓与牵引网接触, 牵引网单相交流电经过牵引变压器降压之后变为中压的单相交流电, 然后经过牵引变流器中的四象限整流器和牵引逆变器后变为可控的三相交流电来驱动牵引电机。既有的工频牵引变压器具有结构简单、可靠性高, 技术成熟等优点, 但也有一些明显的缺点: 如体积和重量大, 影响列车的载客量和高速性能, 特别是在动力分散的动车组上, 安装空间的限制使得变压器体积和重量的影响尤为突出; 工频变压器需用冷却油, 容易给环境造成污染。在提高列车牵引系统转换效率和列车速度的基础上, 减小主变压器的重量和体积已经成为设计人员的主要目标。

电力电子变压器是近几年的研究热点, 其主要应用领域为配电网, 主流拓扑的思路是把工频高压交流电经过电力电子变换器变为中高频交流电, 然后经过中高频变压器进行隔离和降压之后再与高频整流器和逆变器相连。与传统工频变压器相比, 电力电子变压器中增加了中高频隔离变换环节, 但是由于隔离变压器工作频率较高, 其体积和重量远低于普通的工频变压器, 所以电力电子变压器比传统的工频变压器+变流器的功率密度高。随着新材料和新型电力电子器件的不断出现及应用, 中高频变压器和电力电子变换器的效率和功率密度也不断提高, 电力电子变压器的优势日益明显。

目前ABB公司已经研制了一台15 kV/1.2 MVA的电力电子变压器样机并在机车上进行了应用^[1-3]。德国汉堡大学研究提出采用高压AC/AC变换器直接把工频交流电变为中高频交流电, 然后采用中高频变压器进行隔离和降压的方案^[4]。Alstom公司从2003年开始研制采用电力电子变压器的机车牵引变流器, 并于同年12月完成了试验样机开发, 其一次侧采用8级级联H桥整流器与15 kV/16.7 Hz牵引网相连^[5]。波兰哥但斯克工业大学研制了用于城轨牵引系统的电力电子变压器装置, 输入电压为DC 3 000 V, 整机容量335 kVA, 采用1 200 V和1 700 V等级的SiC器件, 在比得哥什至华

沙铁路区间已经实现装车试验, 最高试验速度达到40 km/h^[6]。目前, 世界上暂无适用于25 kV电压等级的电力电子变压器研究报道。在25 kV电压制式条件下, 牵引电力电子变压器面临模块级数增多而导致体积更大、重量更重, 更高电压等级导致绝缘设计难度更大, 因此研制适用于我国牵引网制式的电力电子变压器系统成为赶超世界先进水平的迫切需求。本文通过对25 kV等级下牵引电力电子变压器主电路设计及控制、绝缘设计及冷却等关键技术的研究, 形成了适用于25 kV电压制式的牵引电力电子变压器设计方案, 研制了工程化样机并完成了单支路试验及整机系统试验, 试验结果验证了关键技术及方案设计的有效性。

1 牵引电力电子变压器主电路技术研究

目前国内外大部分科研院所及企业开发的用于电力系统的电力电子变压器^[7-10]均为地面安装, 安装空间较为宽裕, 安装环境及条件普遍较好。轨道交通牵引领域的电力电子变压器有以下几个特点: ①直挂25 kV接触网, 电压等级更高; ②需悬挂吊装至车辆底部或安装于车上空间, 对体积重量有极其严苛的要求, 且需满足轨道交通冲击振动相关标准; ③单相电网, 传输功率中包含较大的二倍频分量。这些特点都给牵引电力电子变压器的主电路设计带来了困难。高压电力电子变压器常采用如图1所示的多支路输入串联、输出并联的拓扑结构。高压侧直挂25 kV接触网, 通过PWM级联模块进行分压, 各级PWM级联模块输出多个不同电位的中间直流电压, 中间直流电压通过DC-DC高频隔离变换器实现电气隔离及电压等级转换, 最终得到直流输出连接牵引逆变器, 驱动牵引电机, 系统框图如图1所示。

隔离型高频DC-DC变换器是电力电子变压器的关键部件, 目前大功率双向隔离型DC-DC拓扑分为4种主要技术路线: 基于LC、LLC或CLLC的谐振软开关高频主电路拓扑和基于双主动全桥的DAB型高频隔离变流拓扑。4种主电路拓扑及性能对比如图2和表1所示。

由于网侧直挂高压, 需要实现变流器及变压器模组对地的高绝缘要求, 变流器模组越集成、个数越少, 其对地绝缘处理的难度越小。因此, 中高压半导体器件是牵引电力电子变压器主电路方案的必然选择。在

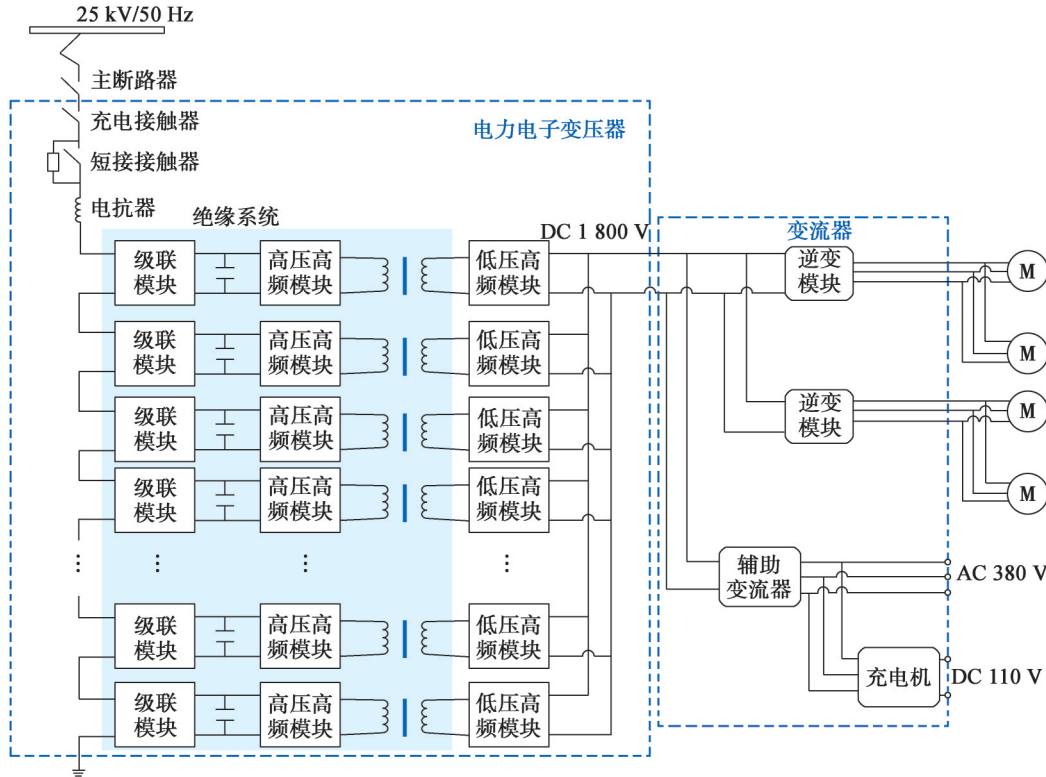


图1 牵引电力电子变压器系统框图

Fig. 1 Block diagram of power electronic traction transformer system

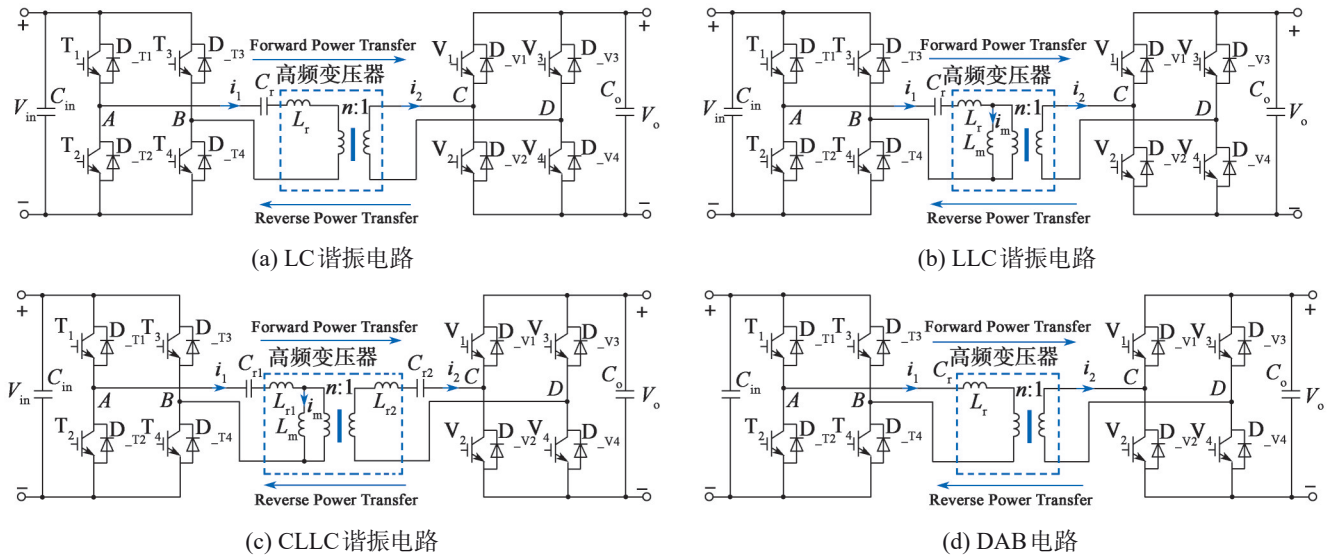


图2 双向高频隔离型DC-DC电路拓扑

Fig. 2 Bidirectional high-frequency isolated DC-DC circuit topology

表1 四种隔离DC/DC拓扑的性能对比

Table 1 Performance comparison of four isolated DC/DC topologies

对比项点	LC	LLC	CLLC	DAB
变增益控制方式	移相控制	可运行在开环固定频率模式和变频宽范围调压模式		移相控制
软开关特性	ZVS开通	主动侧ZVS开通	主动侧ZVS开通	ZVS开通
	关断电流小	整流侧ZCS关断	整流侧ZCS关断	最大电流关断
直流偏置抑制	隔直电容	隔直电容	隔直电容	软件/隔直电容
二次波动抑制	是	否	否	是
正反向增益特性	一致(增益小于1)	不一致(正向可大于1, 反向均小于1)	一致(正反向均可>1)	不受限制
高频变压器励磁电感设计	$L_m \ll L_o$	需根据器件特性、调压及负载范围核算选取设计		无
效率	中	高		低

当前技术状态下, 综合权衡技术与成本的要求, 采用高电压等级的硅基IGBT器件为牵引电力电子变压器主电路应用的现实选择。与SiC器件相比, 中高压硅基IGBT器件存在开关损耗大、死区时间长等缺点, 在工程实现上DAB电路拓扑由于开关损耗大, 控制移相精度要求高, 控制策略较为复杂而不适用于该应用领域。CLLC谐振软开关电路一般应用于小功率、宽幅变频调压领域, 如小功率的充电模块应用, 该电路由于能量正反向流动时电压增益可以保持一致的特性, 适用于输出变直流电压且能量正反向流动的场景, 但其开关频率的大范围变化不适用于大功率器件的应用。采用LLC谐振软开关技术可实现器件软开关、有效减小器件损耗, 使得开关器件频率更高, 减小了高频变压器的体积和重量。相较于CLLC电路拓扑, LLC电路减少了一组谐振电容, 且在定电压下采用定频方波调制方式最为简单, 是大功率高压硅基IGBT器件应用于高频隔离电路的首选方式^[1]。

综合考虑变流器体积重量对高压级联及高频隔离支路数目的限制、当前市场上IGBT器件阻断电压等级最高仅为6 500 V、高压IGBT开关频率相对较低以及工作频率对高频变压器体积重量的影响等因素, 提出了基于3 300 V器件的高压侧三电平NPC全桥、低压侧二电平全桥DC-DC隔离变换电路。单支路电路拓扑如图3所示, 级联四象限由 $S_1 \sim S_4$ 4个6 500 V的IGBT构成二电平全桥, $D_{S1} \sim D_{S4}$ 为其反并联二极管, 整流得到中间直流3 600 V, DC-DC高压侧由 $T_1 \sim T_8$ 8个3 300 V的IGBT和 $D_1 \sim D_4$ 4个箝位二极管构成三电平NPC全桥, $D_{T1} \sim D_{T4}$ 为其反并联二极管, DC-DC低压侧由 $V_1 \sim V_4$ 4个3 300 V的IGBT构成二电平全桥, $D_{V1} \sim D_{V4}$ 为其反并联二极管, C_r 为谐振电容, L_r 为变压器漏感, L_m 为变压器励磁电感。DC-DC变换器采用相同规格的IGBT器件, 有利于在相同的工作频率下实现能量的双向流动。

在单支路控制策略研究方面, 由于网侧级联变流

器控制已批量应用于高压变频器, 控制方法较为成熟, 已经有较多的应用, 在此不再赘述, 其难点主要在于后级隔离型DC-DC变换器的控制。对于高频DC-DC变换器, 若采用传统的控制策略, 在牵引工况下, 三电平NPC全桥触发脉冲输出高频逆变方波, 低压二电平全桥封锁脉冲利用反并二极管将变压器输出方波整流为直流电压; 在制动工况下则相反, 低压二电平全桥触发脉冲输出高频逆变方波, 三电平NPC全桥封锁脉冲将变压器输出方波通过二极管整流为直流电压。考虑实际工程应用中能量流动方向的检测精度和动态响应速度有限, 因此在轻载或者能量流动方向切换时, 极易引起LLC变换器控制方式的振荡式切换, 尤其在对输出电压控制精度较高的场合, 实现LLC型变换器能量流动方向的平滑切换难度更大, 变压器两侧全桥电路功率器件反复触发和封锁, 甚至可能影响功率器件的可靠性及寿命。为了实现能量流动方向的平滑切换, 考虑到在一定工况下, 对一次侧、二次侧全桥电路进行同步驱动使能, 给能量双向流动提供路径, 避免控制方式的反复切换。如图4所示, 以一个开关周期为例, 一次侧 T_1 、 T_8 管与二次侧 V_1 、 V_4 管同步开通关断, 三电平内管 T_2 、 T_7 相较于外管提前开通、延时关断, 以保证箝位二极管足够长的续流时间。

2 牵引电力电子变压器绝缘技术研究

牵引电力电子变压器采用直挂式分压的方案, 主电路及模组对地电压高, 例如第一模组与高压接触网通过电感连接, 其对地电位为接触网的电压, 电力电子变压器若为车底安装, 空间极其有限, 其机壳结构框架与地连接, 因此整机主电路对地绝缘设计难度极大。

为了提升高压模块与整体柜体(接地)之间的绝缘强度, 保证系统运行的可靠性, 对采用气体、液体、固体等多种不同介质的绝缘技术进行了综合研究, 各

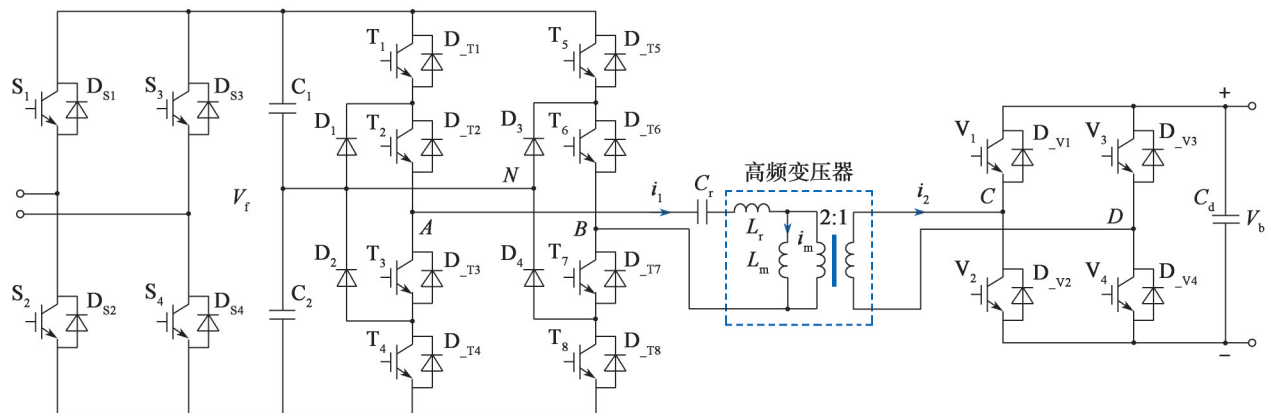


图3 牵引电力电子变压器单支路主电路拓扑

Fig. 3 Single branch main circuit topology of power electronic traction transformer

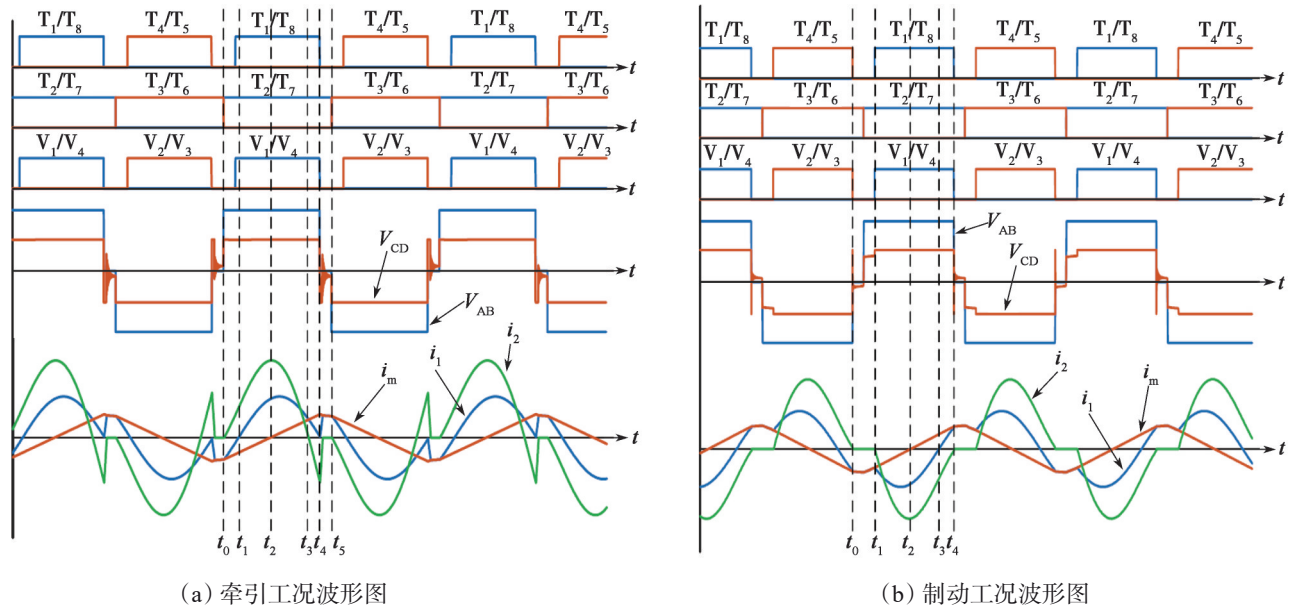


图 4 双边同步调制模式下牵引与制动工况波形图

Fig. 4 Waveform diagram of traction and braking conditions under bilateral synchronous modulation mode

介质的绝缘参数与密度如表 2 所示。由表 2 可知，硅胶绝缘性能最佳，但密度最大，会大幅提高装置的重量，设计上仅能对于极高场强的局部绝缘使用固体硅胶；复合材料优缺点与硅胶相似，且设计加工难度更大，适用于较规则形状的绝缘构件设计；变压器油重量相比硅胶和复合材料略轻，但如果整体采用油浸式绝缘的方式，需要油浸到整个空间，增加了不必要的重量，同时很多电子器件与油有相容性，油浸式绝缘不适用于变流器的绝缘；常压下绝缘气体 SF6 的绝缘强度是空气的 3 倍，灭弧能力是空气的 100 倍，根据实际绝缘需要，常压填充即可加强局部的绝缘性能。

表 2 常用材质的绝缘参数及密度
Table 2 Insulation parameters and densities of commonly-used materials

	空气	绝缘气体 SF6	变压器油	硅胶	基于玻璃纤维的复合材料
绝缘参数/ (kV·mm ⁻¹)	3	约 9	≥10	10~20	约 10
密度/(g·cm ⁻³)	0.001 3	0.006 0	0.900 0	约 2.500 0	约 2.000 0

如图 5 所示，牵引电力电子变压器十二组支路采用单模组整体绝缘的形式，变流模块与变压器对框架及地采用复合材料绝缘安装，可以完成高低压分离式布局设计。相对于变压器集成一体单独绝缘，该方案能极大地降低绝缘设计难度，减少绝缘材料，降低总体重量。为加强主电路对地绝缘，消除放电的风险，在复合材料绝缘壳体中充入绝缘气体，在壳体与变压器的结合部采用固体硅胶加强绝缘，以防止电弧从间隙爬出。通过模块化的绝缘设计技术，简化系统对地绝缘设计，模组之间可实现完全互换。

单支路模组对框架绝缘耐压、冲击试验系统及测

试结果如图 6 所示，主电路对地耐压达到 65 kV/1 min，漏电流最大 2 mA 左右，冲击试验电压可达 -150 kV 而无闪络及击穿。

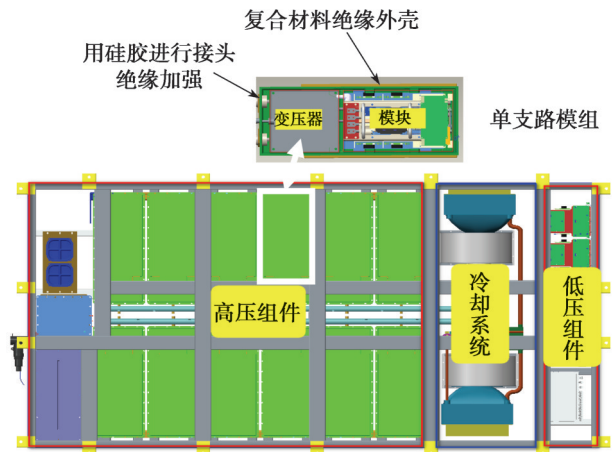


图 5 牵引电力电子变压器整机绝缘系统设计

Fig. 5 Insulation system design of power electronic traction transformer

3 牵引电力电子变压器冷却技术研究

既有牵引系统的工频变压器采用油冷却，变流器采用水冷却，需要 2 套独立的冷却系统。牵引电力电子变压器系统主要部件包含了高频变压器及高频变流器，同时也包含了高压部件与低压部件，在体积受限且部件之间存在高电位差的条件下，如何减小冷却系统的体积与重量成为一大难题。

相变冷却介质一般为具有挥发性的流动液体，具有较低的沸点及较好的绝缘性能，在相变状态下能带走大量的热量，冷却效率较高，能适用于高绝缘要求

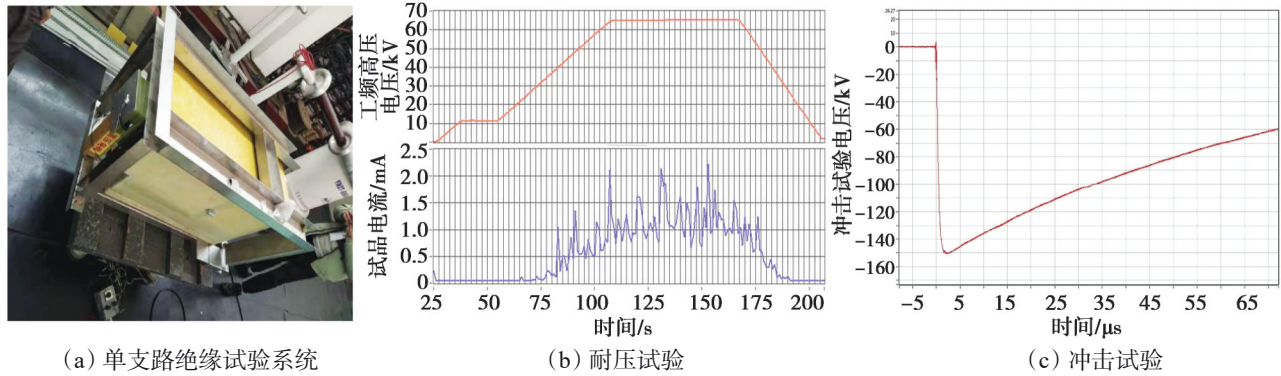


图6 单支路绝缘耐压及冲击试验系统

Fig. 6 Single branch insulation, withstand voltage and impact test system

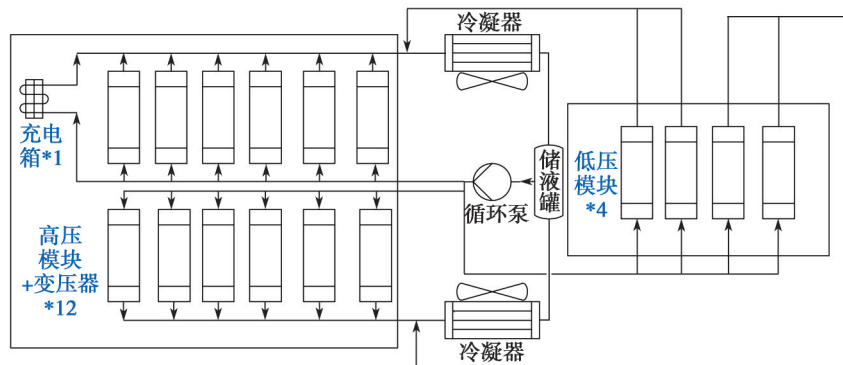


图7 相变蒸发冷却框图

Fig. 7 Block diagram of phase change evaporative cooling

下冷却系统小型化设计要求, 相变冷却系统利用氟碳介质对高频变压器、功率模块以及充电箱等分布式热源进行统一冷却, 以促进实现整机系统体积重量的指标要求。

牵引电力电子变压器主要的发热设备为高/低压功率模块、变压器和高压充电箱, 其热量都由蒸发冷却系统来吸收和传递。相变蒸发冷却系统框图如图7所示, 高压模块加变压器和低压模块作为两大部分并联布置在蒸发冷却系统的两侧, 简称高压侧和低压侧。高压侧共有13组并联分支结构, 包括12组变压器冷板+高压模块冷板以及1组高压充电板翅式换热器; 低压侧由4组低压模块相互并联, 各模块通过集液管和集气管进行连接。

图8为蒸发冷却系统三维结构图。如图8所示, 相变冷却系统的主要部件包括循环泵、蒸发器、冷凝器、风机等, 其中蒸发器与牵引电力电子变压器 (PETT) 各主要设备集成, 其余部件集成于PETT柜体的单独区域, 通过法兰等形式的机械接口分别与高压侧和低压侧相连。基于强迫蒸发冷却循环的基本原理, 结合整机系统的结构布置和空间要求, 将冷却系统布置在高压模块和低压模块中间。2台冷凝器呈两侧对称布置, 中间设置循环泵和调节阀。循环泵的主要作用是提供克服液体流动的单相和两相阻力, 同时保证冷凝器的液位处在合适高度。循环泵出口分为2个支路, 分别连接高压和低压模块, 支路上设置阀门以保证流量的分配, 使得高低压模块在不同的工况下均获得充足的流量。相变冷却系统可以实现变压器与变流器的一体化冷却, 体积

与重量相较于原牵引系统油冷加水冷系统大幅减小, 同时能实现对高频模块与高频变压器的精细化冷却。

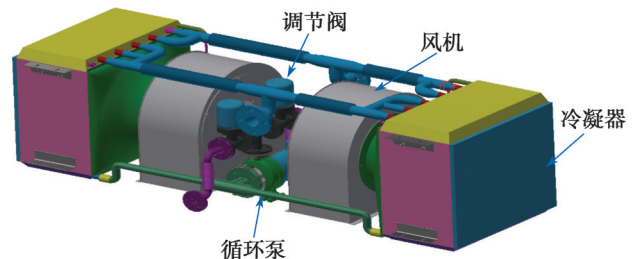


图8 蒸发冷却系统三维结构图

Fig. 8 Three dimensional structure block diagram of evaporative cooling system

4 牵引电力电子变压器试验

牵引电力电子变压器试验分为单支路试验和整机试验。单支路试验的目的是对电力电子变压器中一组支路进行能量正反向流动的功能性试验验证, 主要部件包括前端网侧的AC-DC级联变流器和隔离型DC-DC变流器, 具体参数如表3所示。

单支路试验台如图9所示。试验台包含高压变流模块、低压变流模块、高频变压器、冷却系统等关键部件, 对单支路条件下牵引制动工况进行了试验验证。

单支路拓扑系统工作在牵引制动稳定状态下的波

表3 单支路试验系统参数

Table 3 Parameters of single branch test system

参数项目	输入电压	容量	工作频率	变压器一次侧电流
参数值	2 090 V	140 kV·A	5.4 kHz	55 A
参数项目	输入电流	输出电压	死区时间	变压器二次侧电流
参数值	64 A	1 800 V	8 μs	110 A

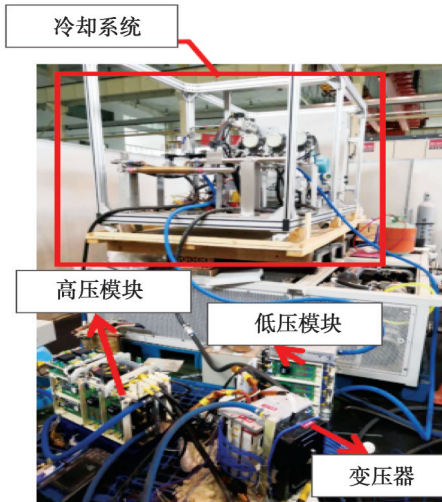


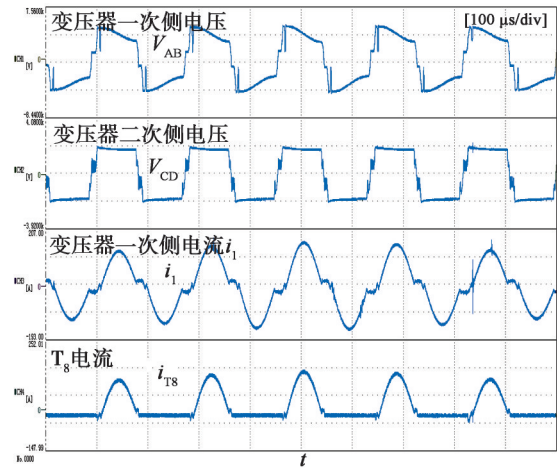
图9 单支路系统试验装置图

Fig. 9 Single branch system test devices diagram

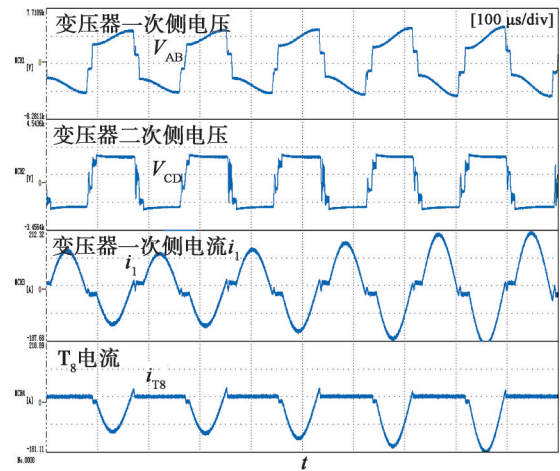
形图如图10所示。图10中， i_1 为变压器一次侧电流波形； i_{T8} 对应高压模块一次侧 T_8 管的电流波形； V_{AB} 、 V_{CD} 分别对应变压器一次侧、二次侧电压波形图。在牵引状态时，电压和电流波形同相；在制动状态时，电压和电流波形反相，能实现能量的正反向流动。单支路拓扑系统工作在牵引制动切换状态下的波形如图11所示， V_b 为三电平中间直流上半桥电压， V_f 为输出直流电压，当单支路系统从满功率牵引切换至满功率回馈状态时， V_b 及 V_f 电压平稳。

牵引电力电子变压器系统如图12所示，整个系统包含电力电子变压器电气柜、牵引逆变器及冷却柜。该系统在某型城际概念车上完成了装车试验验证，运行速度达45 km/h，完成牵引制动功能试验验证。

整车运行时，牵引电力电子变压器及牵引逆变器波形如图13，在牵引转惰行及惰行转制动工况下，高压侧12重级联模块中间直流电压偏差小于2%，输出电压波动范围小于3%，均达到了预期效果。



(a) 牵引状态下电压和电流波形图



(b) 制动状态下电压和电流波形图

图10 单支路系统稳态下电压电流波形图

Fig. 10 Voltage and current waveform diagram of single branch system under steady state

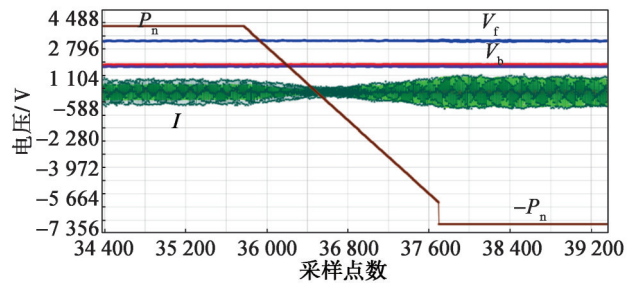


图11 单支路系统从牵引向制动切换时电压电流波形图

Fig. 11 Voltage and current waveform of single branch system during switching from traction to braking



(a) 电力电子变压器



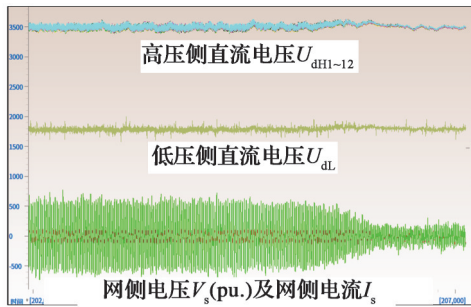
(b) 牵引逆变器



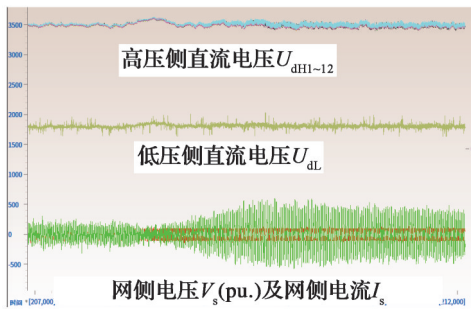
(c) 冷却柜

图12 牵引电力电子变压器系统

Fig. 12 Power electronic traction transformer system



(a) 45 km/h牵引切换惰行工况



(b) 45 km/h惰行切换制动工况

图13 电力电子变压器电压和电流波形

Fig. 13 Voltage and current waveform of power electronic transformer

5 结语

针对适用于我国牵引网制式的牵引电力电子变压器系统, 本文研究了牵引电力电子变压器的关键技术, 提出了牵引电力电子变压器主电路拓扑, 控制技术、绝缘设计、冷却系统工程化设计方法, 并对牵引电力电子变压器单支路及整机系统进行了试验验证, 得出以下结论:

① 基于NPC的三电平LLC高频主电路拓扑通过双边同步控制策略能有效实现牵引制动能量的切换, 在切换过程中能保持高压侧中间直流电压及输出电压的稳定。

② 提出系统绝缘与冷却的工程化设计方法并进行了整机试验验证, 结果表明: 采用固体与气体结合的复合绝缘方式及相变蒸发冷却介质的冷却系统能有效保障系统的运行。

未来, 在冷却及结构技术方面, 需对牵引电力电子变压器各关键技术及部件进行可靠性研究, 对其在强振动环境下的寿命及可靠性进行进一步探索。在控制技术方面, 继续对在多电力电子变压器运行条件下的单车或多车稳定性进行深入研究, 并提出适用的控制策略, 使得系统能最终实现工程化应用。

参考文献:

- [1] ZHAO Chuanhong, DUJIC D, MESTER A, et al. Power electronic traction transformer-medium voltage prototype [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3257-3268.
- [2] DUJIC D, ZHAO Chuanhong, MESTER A, et al. Power electronic traction transformer-low voltage prototype[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5522-5534.
- [3] BESSELMANN T, MESTER A, DUJIC D. Power electronic traction transformer: efficiency improvements under light-load conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 3971-3981.
- [4] GLINKA M, MARQUARDT R. A new single phase AC/AC-multilevel converter for traction vehicles operating on AC line voltage[J]. EPE Journal, 2004, 14(4): 7-12.
- [5] RIECHERS D, 王渤洪. ALSTOM公司的电子变压器"e Transformer"——动车组用创新的电子电源系统[J]. 变流技术与电力牵引, 2004(5): 31-32.
RIECHERS D, WANG Bohong. Electronic transformer "e transformer" of ALSTOM—innovation electronic power system used in EMU[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2004(5): 31-32.
- [6] ADAMOWICZ M, SZEWCZYK J. SiC-based power electronic traction transformer (PETT) for 3 kV DC rail traction [J]. Energies, 2020, 13(21): 5573.
- [7] LIU Tao, YANG Xu, CHEN Wenjie, et al. High-efficiency control strategy for 10 kV/1 MW solid-state transformer in PV application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11770-11782.
- [8] LIU Tao, YANG Xu, CHEN Wenjie, et al. Design and implementation of high efficiency control scheme of dual active bridge based 10 kV/1 MW solid state transformer for PV application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4223-4238.
- [9] LU Cheng, HU Wenfei, LEE F C. Neutral-point voltage balancing methods of series-half-bridge LLC converter for solid state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 7060-7073.
- [10] WANG Dan, YANG Yun, TIAN Jie, et al. Design and implementation of 10 kV MW-level electronic power transformer (EPT)[C]//IEEE. 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 1-10.
- [11] DUJIC D, STEINKE G K, BELLINI M, et al. Characterization of 6.5 kV IGBTs for high-power medium-frequency soft-switched applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 906-919.