

高速动车组蒸发冷却牵引变压器关键技术探讨

熊 斌¹, 程自然², 赵玉峰²

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
2. 湖南大学电气信息与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 本文针对浸润式蒸发冷却车载牵引变压器自循环系统及其中的关键技术进行了论述和可行性分析,并阐述了其冷却系统结构设计的思路。考虑到动车组在实际运行中遇到的加速及刹车等特殊工况以及列车在高速行驶中牵引变压器温升和不燃不爆等基本要求,基于变压器内部的绝缘特性以及冷却系统运行时的散热性能,提出了采用蒸发冷却技术来实现车载牵引变压器自循环冷却系统的新方案,该方案能够有效地提高现有车载牵引变压器设备在动车组运行时的安全性和可靠性,同时也为之后车载牵引变压器系统的轻量化设计提供了基础。

关键词: 车载牵引变压器; 蒸发冷却技术; 冷却系统; 散热性能; 安全性能

DOI: 10.12067/ATEEE2001005 **文章编号:** 1003-3076(2020)09-0001-05 **中图分类号:** TH11

1 引言

伴随着我国轨道交通事业的高速发展,我国铁路电气化基础建设正在向着世界强国稳步迈进。预计截至 2020 年年底,我国铁路电气化里程将达到 15 万 km,其中高速铁路 3 万 km,到时将覆盖 80.0%以上的大城市,高速铁路装备的整体水平也将进一步提升,因此车载变压器作为高速动车组中的重要电力设备,其需求还将持续不断地增加。车载变压器作为动车系统中的耐受高压设备,在高速动车组系统中承担着不可或缺的作用,车载变压器通过电磁能量转换的形式将铁路上空高压输电线中的电能输送给电力机车牵引设施,为机车动力系统提供所需的电力能源,其绝缘和散热性能将直接影响动车组供电系统的安全稳定运行^[1]。然而随着当今世界电气设备发展的日新月异,国内机车牵引变压器技术也面临着巨大的竞争和挑战,目前车载牵引变压器设备正朝着不燃不爆和小型轻量化的方向发展,其安全运行性能及轻量化设计是当下亟待解决的问题^[2,3]。

车载牵引变压器在动车组高速运行时温升要求能够稳定维持在正常范围之内是保障电力机车车组

正常运行的基本要求,在动车组运行的过程中车载变压器会因为各部分的损耗而持续发热,过高的温度将加速变压器中绕组间绝缘材料的老化从而缩短其使用寿命^[4],在工作过程中,一旦变压器局部最热点发热温度超过最高许用值时,变压器的寿命将会锐减^[5,6]。针对车载牵引变压器在运行过程中出现的温升问题,目前普遍采取的解决方式是采用绝缘油冷却技术,但是由于油浸式变压器冷却系统体积庞大,使得车载牵引变压器很难朝着小型轻量化发展^[7],因此无论是在车载变压器的冷却系统设计还是在车辆的实际运行过程中,系统的温升问题都将上升为变压器安全稳定和轻量化设计中的一个主要矛盾。同时变压器损耗、发热以及负载能力的确定,都与冷却系统的散热性能密切相关,因此车载牵引变压器散热新技术的研究对于动车组的安全运行以及铁路交通行业的经济性能都有着重要的意义。

目前国内大容量车载牵引变压器为油浸式,然而绝缘油本身的可燃性是电力机车系统中的一个重大安全隐患,考虑到高速动车组安全性能的要求,采用不燃不爆的氟碳工质作为蒸发冷却牵引变压器中的冷却工质可以从根本上避免变压器因温度过高而引起的火灾事故。但就目前而言,国内基于氟碳工

收稿日期: 2020-01-06
基金项目: 中国科学院电工研究所所长基金(Y920111CS2)
作者简介: 熊 斌(1979-),男,重庆籍,副研究员,博士,研究方向为电机及变压器新型冷却技术;
程自然(1993-),男,湖南籍,博士研究生,研究方向为电机系统设计与分析。

质相变换热原理开展的蒸发冷却变压器的研究开发却相对滞后,同时伴随着国内蒸发冷却技术及冷却工质的成熟和应用的发展^[8],针对车载牵引变压器的安全运行性能、经济性能以及轻量化的需求,国内应用氟碳工质蒸发冷却的变压器研究也迫在眉睫^[9]。

2 车载牵引变压器蒸发冷却技术

中国科学院电工研究所自 20 世纪 50 年代起开始开展氟碳工质蒸发冷却技术在电气设备中的应用研究,至今已先后在大型发电机组、变频器以及超级计算机等领域取得了许多优异的成果^[10-14],并在研究过程中积累了大量的工程实践经验和技術储备,为蒸发冷却技术在车载变压器中的应用提供了坚实的基础。

2.1 车载牵引变压器

铁路三相牵引系统中的电能通过地面牵引供电站将电能分别传输给两个负载相同的单相牵引电路,再通过车载牵引变压器给列车提供电能,本文中设计的蒸发冷却车载牵引变压器的主要电气参数如表 1 所示。

表 1 牵引变压器电气参数

Tab.1 Traction transformer electrical parameters

参数	数值
变压器容量/(kV·A)	3 600
额定频率/Hz	50
电网侧电压/V	25 000
电网侧额定电流/A	144
牵引侧电压/V	970
牵引侧额定电流/A	927. 8×4

车载牵引变压器与普通电力变压器在电磁原理上基本相同,根据铁心布置形式的不同可以分为心式变压器和壳式变压器;根据绕线形式的不同可以分为饼式绕组和层式绕组;根据铁心和线圈放置位置的不同可以分为立式和卧式两种形式。车载牵引变压器通常布置在动车车厢底部,通过强迫风冷对变压器油箱中的冷却油进行散热。

迄今为止,低廉的价格、优良的电气性能以及较大的比热容使得变压器绝缘油一直以来都充当着车载牵引变压器油箱中的液体绝缘和冷却工质。由于工质本身良好的散热性能,变压器绝缘油通过循环装置能带走铁心和绕组在工作运行过程中产生的大量热量。绝缘纸经过变压器油浸泡后形成的油纸绝缘结构具有较高的电气强度,同时变压器油在系统

工作运行中还具有灭弧等作用,这些都使得油浸式变压器具有优良的绝缘特性。但变压器绝缘油在高温下具有可燃性一直以来都是动车组安全性能所面临的一个重大隐患。

2.2 变压器蒸发冷却技术原理

与传统车载油浸式牵引变压器的散热形式不同,浸润式蒸发冷却牵引变压器是利用氟碳工质相变换热时吸收的大量汽化潜热来带走变压器运行时铁心和绕组中产生的热量。由于氟碳工质本身具有不燃不爆、粘度低、较好的绝缘以及散热特性,因此氟碳工质可同时作为变压器蒸发冷却系统中的冷却工质和绝缘工质。如图 1 所示,蒸发冷却系统采用氟碳工质作为散热工质时,系统依靠氟碳工质相变换热的两个过程,即液态工质吸热蒸发汽化自然向上流动和气体工质冷凝液化后受自身重力作用流回管底这两个过程,来实现冷却系统的无泵自循环。作为绝缘工质时,基于氟碳化合物在两相流工作状态下特殊的放电和击穿机理来构建整个变压器系统的横向绝缘和纵向绝缘结构设计。

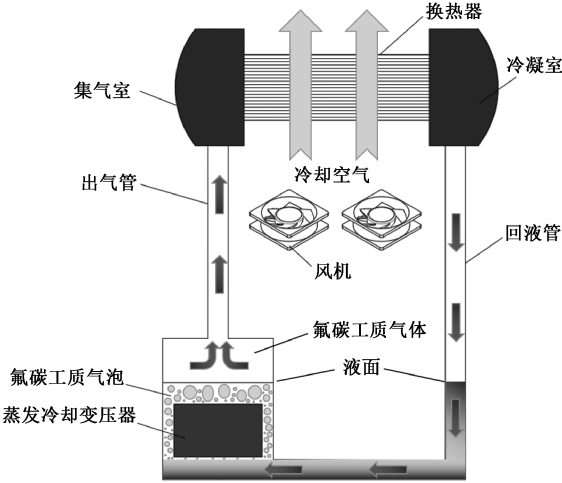


图 1 车载牵引变压器蒸发冷却技术原理图

Fig.1 Schematic diagram of traction transformer evaporative cooling technology

3 车载牵引变压器器身结构

由于心式变压器结构简单,易于加工制造,高压绕组与铁心之间的距离较远,系统内部的绝缘结构容易实现,因此目前国内的变压器厂家多采用的是心式变压器结构。相比于心式变压器结构而言,壳式变压器结构上更为坚固,能够承受住较大的电磁力,特别适用于低压绕组中通过大电流的变压器,但是其制造工艺比较复杂,高压绕组与铁心柱间的距

离较近,绝缘处理较困难,因此生产成本高。所以基于上述的分析和对比可以得出,车载牵引变压器的铁心设计成心式的结构更适合于小型轻量化的蒸发冷却系统。

3.1 车载牵引变压器线圈箱体结构设计

图2为蒸发冷却车载牵引变压器箱体结构,箱体顶部和侧边的盖板上装有工质自循环连接管道,高低压绕组从右侧的接线盒中引出出线,器身整体最终由螺栓及法兰密封结构进行完整地密封。变压器箱体内装有氟碳工质,心式线圈整体浸泡在氟碳工质中,箱体和变压器夹件之间依靠底板以及横梁上的螺栓进行固定,运行时液体绝缘工质通过充满箱体内部的所有缝隙来实现高低压绕组以及箱体内部的绝缘。

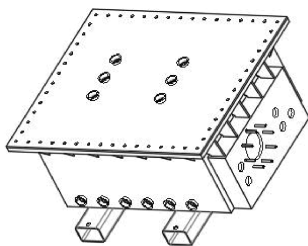


图2 蒸发冷却车载牵引变压器箱体结构

Fig.2 Tank structure of evaporative cooling traction transformer

由于动车组底部的高度尺寸通常受到限制,因此本台变压器设计成“卧倒”的形式放置于车厢底部,如图3所示。变压器采用饼式绕组绕制,高压线圈布置在心柱外侧,低压线圈布置在心柱内侧,两心柱绕组的高压支路相互串联,低压支路相互并联,以减少系统的负载损耗以及绕组中铜的用量。高低压绕组间采用绝缘套筒隔绝,内部绝缘结构中开有垂直向上的流道。箱体内部的蒸发冷却工质通过吸收变压器绕组和铁心中产生的热量而汽化,气泡通过线圈间垂直方向上的散热流道向上流通,汽化后的气体工质进入冷凝器中进行自冷或强迫风冷二次散热。

3.2 变压器箱体填充结构设计

蒸发冷却系统中氟碳工质只需浸没变压器内的发热部件而不需充满整个系统,同时氟碳工质具有良好的化学稳定性,与其他变压器常用的电气绝缘材料如硅氟橡胶、无纬带、Nomex纸、酚醛纸板、3040环氧板等具有良好的相容性,因此基于变压器箱体结构轻量化设计的需求,可以采用密度较小的绝缘

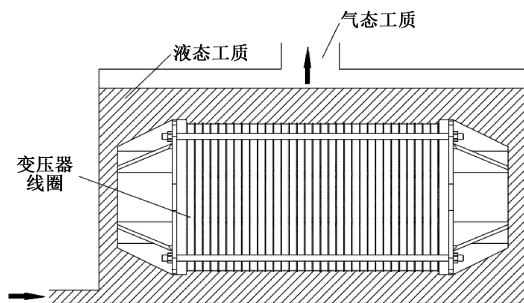


图3 蒸发冷却车载变压器线圈结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of evaporative cooling traction transformer coil structure

材料来填充箱体内部不发热且不需要的多余空间。考虑到动车组在实际运行中遇到的振动和冲击问题,填充后的结构能增加变压器结构的强度和刚度,如图4所示,在铁心外包裹一层绝缘芯筒,芯筒在轴向上开有均匀的垂直流道,这样在增强结构强度的同时又能保证铁心和低压绕组之间的绝缘性能。

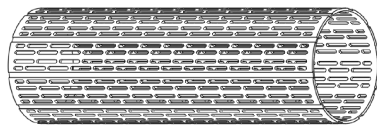


图4 铁心绝缘芯筒结构

Fig.4 Construction of insulated core tube

箱体中被绝缘材料填充的空间不仅可以减少氟碳工质的用量,设计时还可以根据变压器在动车组中的实际布置位置来进行调整,以形成有利于蒸发冷却工质向二次换热器方向流动以及冷凝回流的空间。针对冷却系统中容易发生击穿和放电的部位,通过填充特殊形状的绝缘结构以加强关键部位的绝缘性能,如图5中所示的高压绕组端部绝缘结构,端环中心开设有凹槽结构,在有效地增加高压绕组端部对铁心以及夹件间的爬电距离的同时,还能起到填充机箱内空余空间以及固定支撑高压绕组的作用。

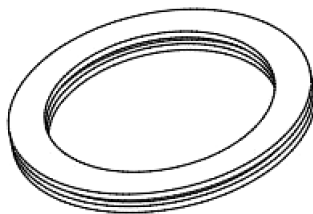


图5 高压绕组端部绝缘结构

Fig.5 Insulation structure of high voltage winding end

4 车载牵引变压器蒸发冷却系统

变压器中铜损和铁损产生的热量使得变压器铁心和绕组中的温度升高,之后由于和外界存在的温度梯度差促使铁心和绕组中的热量通过周边的冷却工质依次向外界传递。变压器冷却系统中的散热主要是依靠热传导、热对流和热辐射来实现,而冷却系统散热性能的设计则是基于氟碳工质的传热特性来优化变压器内部温度场分布以提高系统换热效率。

4.1 变压器冷却系统散热分析

变压器绕组中的热量通过热传导传至绝缘纸外部,之后与氟碳工质发生对流传热,同时器身箱体时时刻刻也与外部温度较低的工质发生着辐射换热。但由于热传导的系数较大,同时绕组和铁心通过辐射散发的热量与对流散热相比可忽略不计,因此蒸发冷却变压器中的对流散热又是系统内最主要的换热形式。

氟碳工质在工作时依靠自然对流所散发出的热量与工质自身的温度、压力、流速以及两相的流型等诸多因素有关,因此在冷却结构的设计中应尽量减少冷却系统中管路的流动阻力,促进工质的循环流动,以提高氟碳工质的对流换热系数。

4.2 变压器冷却结构设计

对于冷却系统的工程结构设计而言,蒸发冷却管路和二次散热装置作为散热结构设计中的核心部件,将影响整个变压器冷却系统散热性能的好坏以及额定容量的大小。本文中设计的变压器蒸发冷却自循环系统如图6所示,主要由变压器箱体蒸发室、集气管道、散热风扇、冷却液回流管以及二次散热装置等组成。冷却管路选用波纹管搭建而成,垂直分布于变压器箱体两侧,波纹管之间通过法兰密封结构进行连接,端部通过弯管连接在变压器机箱的顶部和侧面,冷凝器上装有片式散热器和散热风扇用来提高二次换热系统的有效散热面积和散热性能。

氟碳工质由于流动性能优良,运动粘度小,因此同传统油浸式变压器散热系统相比,具有更好的换热和散热能力。由于浸润式蒸发冷却系统在运行时内部的氟碳工质能够充分地系统与发热元件进行换热,所以在运行时冷却系统内部的温度场分布较为均匀,局部热点温升相对较低,避免了系统出现局部过热等问题。该系统能够通过氟碳工质蒸发和冷凝回流形成的压差驱动整个冷却回路的自动运行,



图6 车载牵引变压器自循环系统

Fig.6 Insulation structure of high voltage winding end

无需外加其他动力,因此整个系统具有噪声小、运行维护成本低的特点。

5 结论

浸润式蒸发冷却车载牵引变压器系统具有不燃不爆、运行维护简单、安全性能高、体积小等优点,本文基于氟碳工质相变换热特性提出了一种车载蒸发冷却牵引变压器结构轻量化设计的方案,该方案在充分利用了变压器箱体内部空间的同时有效地解决了系统内的绝缘问题。后续为进一步优化和完善本方案中提出的几个关键技术路线,需要在样机试验和生产制备的过程中收集相关的数据做出研究分析,同时还需要对变压器蒸发冷却技术及其相关理论进行更加深入地探索和研究。

参考文献 (References):

- [1] 付丽君, 刘伟伟, 张亮, 等 (Fu Lijun, Liu Weiwei, Zhang Liang, et al.). 论油浸式变压器的绝缘材料 (Analysis of insulation material of oil-immersion transformer) [J]. 黑龙江电力 (Heilongjiang Electric Power), 2019, 41 (3): 323-237, 243.
- [2] 张雪原, 吴广宁, 何常红, 等 (Zhang Xueyuan, Wu Guangning, He Changhong, et al.). 车载牵引变压器小型轻量化研究 (Study on miniaturization and lightening of on-board traction transformer) [J]. 机车电传动 (Electric Drive for Locomotives), 2007, (4): 5-8.
- [3] André-philippe C, Didier F. Evolution and future of traction transformer on rolling stocks [A]. IEEE 2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS) [C]. 2015. 1-6.

- [4] Eckholz K, Knorr W, Schäfer M, et al. New developments in transformer cooling calculations [A]. Int. Conf. Large High Voltage Electric Systems [C]. 2004.
- [5] 全好, 阮江军, 龚若涵, 等 (Quan Yu, Ruan Jiangjun, Gong Ruohan, et al.). 基于流线和 SVR 的变压器热点温度反演方法 (Transformer hot-spot temperature inversion method based on streamline and support vector regression) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (11): 23-31.
- [6] 赵义焜, 张国强, 郭润睿, 等 (Zhao Yikun, Zhang Guoqiang, Guo Runrui, et al.). 变压器耐高温型匝间绝缘材料的放电特性研究 (Study on discharge characteristics of heat resistant inter-turn insulation materials in power transformers) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (3): 1-9.
- [7] 孔丽君 (Kong Lijun). 交流传动机车冷却技术的发展 (Development of cooling technique for A. C. locomotive) [J]. 内燃机车 (Railway Locomotive and Motor Car), 2009, 32 (4): 2-6.
- [8] 顾国彪, 阮琳, 刘斐辉, 等 (Gu Guobiao, Ruan Lin, Liu Feihui, et al.). 蒸发冷却技术的发展, 应用和展望 (Developments, applications and prospects of evaporative cooling technology) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (11): 1-6.
- [9] 张明辉, 韩旭, 王亮, 等 (Zhang Minghui, Han Xu, Wang Liang, et al.). 蒸发冷却变压器综述 (Comprehensive discussion of evaporative cooling transformers) [J]. 变压器 (Transformer), 2018, 55 (11): 35-39.
- [10] Li Z, Ruan L, Liu F, et al. The study of evaporative cooling technology in electric and electronic equipment [A]. 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE [C]. 2012. 1-4.
- [11] Chen J, Ruan L. The stator bar's transient temperature characteristic of evaporative cooling generator-motor [A]. 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE [C]. 2014. 339-343.
- [12] Zhang P, Ruan L. Theoretical and experimental study of the influence of different spray inclinations and positions on spray cooling heat transfer [A]. 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE [C]. 2014. 2389-2391.
- [13] Guo S Q, Ruan L, Li Z G, et al. The design of controlling system in the evaporative cooling super computer simulation experiment platform based on PLC [A]. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd [C]. 2013, 437: 734-739.
- [14] Xiong B, Ruan L, Gu G B, et al. Application of evaporative cooling technology in super-high power density magnet [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85 (2): 02A913.

Research on key technologies of evaporative cooling traction transformer of vehicle

XIONG Bin¹, CHENG Zi-ran², ZHAO Yu-feng²

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. College of Electrical Information and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The feasibility of the evaporative cooling auto-circulation system of vehicle traction transformer and the key technologies of the system have been discussed and analyzed in this paper. The idea of the cooling system structure design has been expounded. The special conditions of acceleration and braking encountered in the actual operation of the electric multiple units (EMU) as well as the basic requirements of the traction transformer temperature rise and non-ignition and non-explosion in the high-speed running period are taken into account. A new scheme to realize the self-circulation evaporative cooling system of the vehicle traction transformer is proposed based on the insulation characteristics of the transformer and the heat dissipation performance of the evaporative cooling system. This scheme can effectively improve the safety and reliability of the vehicle traction transformer equipment and it can also provide the basis for the lightweight design of vehicle traction transformer system in the future.

Key words: vehicle traction transformer; evaporative cooling technology; cooling system; cooling performance; safety performance