

文章编号:1005-0523(2009)06-0035-05

广州地铁一号线牵引电机烧损分析及对策

陈 威

(广州市地下铁道总公司 车辆中心,广东 广州 510380)

摘要:广州地铁一号线在最近 2 年的运行过程中,已经出现 5 起牵引电机烧损故障。故障现象表现为定子绕组绝缘击穿,线圈与定子铁芯电腐蚀严重,转子表面对应于定子绕组烧损处出现环状烧痕。本文针对一号线牵引电机烧损现象,分析了产生原因并提出了应对措施。

关键词:牵引电机;绝缘击穿;真空压力浸漆

中图分类号:TM922.72 **文献标识码:**A

一号线采用基于矢量控制的 VVVF 变压变频 PWM 脉宽调制的交流传动系统,具有与直流调速系统相媲美的调速性能,但在交流传动系统中,牵引电机的可靠性受到其绝缘性能的制约,特别在基于 PWM 脉宽调制变频器供电的三相异步牵引电机中^[1],电机定子绕组反复承受短时矩形电压脉冲的冲击,电机绕组端电压变化率很大,这对牵引电机绝缘性能的要求很高,否则电机很容易发生绝缘击穿,以致烧损电机。一号线牵引电机在最近 3 年已有 5 台烧损,全部都是由于定子绕组绝缘击穿造成,因此,一号线牵引电机在经过 10 多年的运行后,定子绝缘老化的趋势不可避免,如不采取措施,牵引电机烧损的情况还会继续出现,将严重威胁列车正常运营。

1 定子绕组绝缘击穿分析^[2-4]

一号线牵引电机为 SIEMENS 纽伦堡工厂生产的型号为 1TB2010-0GA02 的三相四极鼠笼式电动机,采用 VVVF 牵引逆变器供电,额定功率 190 kW,定子绕组为双层分布式嵌线,定子槽数 60,极距 15,采用 60° 相带,每极每相槽数为 5。定子绕组绝缘系统为 Mica-lastic,绝缘等级 200,主绝缘采用粉云母玻璃丝带与聚酰亚胺薄膜,匝间绝缘为 KAPTON 薄膜,采用有机硅树脂作为绕组浸渍漆,并且在绕组出槽口采用 Nomex 纸以增强线圈的耐振动能力,同时采用 VPI(真空压力浸漆)技术进行固化成型。

一号线大多数牵引电机运行已达百万公里,就目前的烧损情况看,其故障比率还是相对较低。但是在长时间的运行后,其绝缘性能势必会下降,并且由于其供电环境不变,电机烧损的几率相对而言更高,故有必要对烧损原因进行分析,从定子绕组烧损现象看,造成牵引电机烧损的原因主要有以下 3 点。

1.1 电机绕组端电压过冲^[2]

PWM 供电相比于正弦工频供电,牵引电机绝缘系统承受的电压变化率对绕组冲击更大,一号线 VVVF 牵引逆变器最大开关频率 450 Hz, GTO 上升沿时间大约 1 μ s,定子绕组端电压脉冲变化时间很短,因此容易在上升沿或下降沿出现电压过冲,产生尖峰电压,导致绕组电压分布不均匀。如图 1 所示, PWM 脉冲的上升沿出现振荡尖峰,从最大值衰减到正常水平。

当然,电机端电压过冲的原因并不是单一因素导

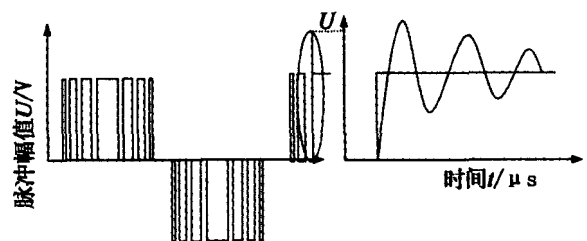


图 1 PWM 脉冲振荡尖峰

收稿日期:2009-09-29

作者简介:陈 威(1984-),男,湖北孝感人,助理工程师,研究方向为电子电子与电力传动。

致,电缆与电机的阻抗匹配、匝间电感与电容的分布都会对电压过冲产生较大的影响。目前研究比较多的是基于传输线理论的电缆特性研究^[2],国外已有学者研究了 PWM 脉冲过电压幅值与高频振荡的关系,认为电缆长度越长,脉冲电压幅值越大,振荡频率越低。当电缆长度达到或超过某一临界长度时,过电压幅值会近似达到额定电压的 2 倍。过电压的幅值和振荡频率与电缆长度,阻抗匹配以及脉冲上升沿时间等因素关系紧密。从目前一号线烧损的 5 台电机位置来看,3 台位于第 3 轴,2 台位于第 4 轴,其连接电缆距离牵引逆变器大约为 15~17 m,相比第 1 轴,第 2 轴 2~4 m 距离相对较远。根据以上理论,第 3 轴,第 4 轴牵引电机端电压过冲比第 1,2 轴严重,因此对电机绝缘的影响较大。

还有学者在模拟的电机定子绕组上进行了电压波形的测量和分析研究结果表明,约 80% 的过电压加在了定子绕组的首端几匝上,这样绕组首匝处承受的匝间电压超过平均匝间电压 10 倍以上,再加上电机端子反射波约 2 倍的尖峰过电压,绕组首匝处承受的匝间电压将超过常规匝间电压值的 20 倍以上,如此大尖峰电压对绕组绝缘冲击很大,并导致绕组电压分布不均,容易在绝缘薄弱处产生局部放电(电晕),致使绝缘逐渐失效。

1.2 绕组绝缘材料局部放电的影响

发生局部放电的主要原因是过电压致使绝缘体内部或表面电场强度分布不均,特别是当绝缘内部存在缺陷时,例如存在气隙或金属杂质等,出现某些区域的电场强度高于平均电场强度或击穿场强低于平均场强的情况,从而导致在该区域发生放电现象。而电机在制造过程中又不可避免地或多或少会存在缺陷,例如绕组绝缘与槽壁间的气隙导致槽放电,严重影响绕组绝缘。有资料表明,绕组绝缘内部的局部放电现象对绝缘寿命的影响很大。局部放电会造成空间电荷的抽出与注入,增加绝缘材料介质损耗,并逐渐导致绝缘材料发热分解,致使绝缘性能降低。

目前对绝缘局部放电的研究已经成为评价绝缘材料性能和寿命的重要方向。由于局部放电的复杂性,需要通过多种表征参数(最大放电电量、平均放电电量、放电重复率、起始放电电压等)才能全面地反映绝缘状态。局部放电的检测大多都是通过脉冲电流检测法进行,然后对采集到的数据特征参数进行统计分析,从而评估试验对象的绝缘性能,测试标准可以参阅 IEC60851-5。国内外已有研究表明局部放电的表征参数随着老化程度的加剧呈现出一定的变化规律,并且通过分析这些参数,可以了解绝缘在热老化作用下内部缺陷的微观变化。

1.3 电机绕组发热对绝缘的影响

在 PWM 脉冲波中,除了占主要比例的基波成份,还含有不同程度的高次谐波(3 次,5 次,7 次等谐波)。各种谐波会导致电机铜损和铁损增加,致使电机发热。通过对一号线 VVVF 逆变器输出电压电流进行实测,选取 AWO 状态下牵引工况 $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 与 $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的电压电流波形,如图 2~5 所示。对电流波形进行频谱分析,发现在 $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 状态下,电流各次时间谐波的含量比在 $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下的要高,并计算逆变器输出电流的 THD(总谐波畸变率),可以得出 $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下 THD 为 39.4%, $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下 THD 为 30.7%。

通过频谱分析,可以得出基波和谐波的比例分配。以上数据可以表明,一号线牵引电机的供电质量还是比较差的,牵引逆变器输出电流谐波成分含量较大,一号线牵引电机采用风扇自冷,并且没有装设温度传感器,在电机运行过程中,无法掌握电机温升和发热情况。在牵引电机后端直线出槽口处为出风口,牵引电机通过该处与外界进行热量交换,因此,该区域温度相对其他区域较高,发热对该区域的绝缘老化程度影响相对较大,而一号线几台牵引电机的烧损位置就处于该区域,绝非巧合。集肤效应的作用也会增加电机损耗,特别是转子的铜耗,也会增加电机发热。另外,高次谐波所产生的电磁激振力会导致绝缘磨损,进一步削弱绕组绝缘性能。

牵引电机的损耗发热会加剧绕组老化,并且热量会使绝缘材料膨化,进一步增强局部放电或者电晕的力度,使绝缘性能下降,在过电压尖峰的作用下就很容易导致绝缘击穿。

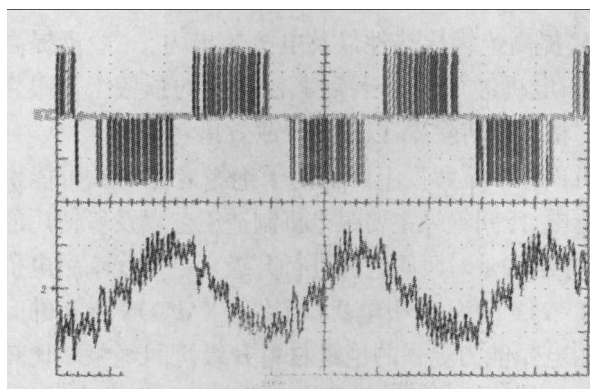


图2 AWO状态下牵引工况 20 km·h⁻¹电压电流波形

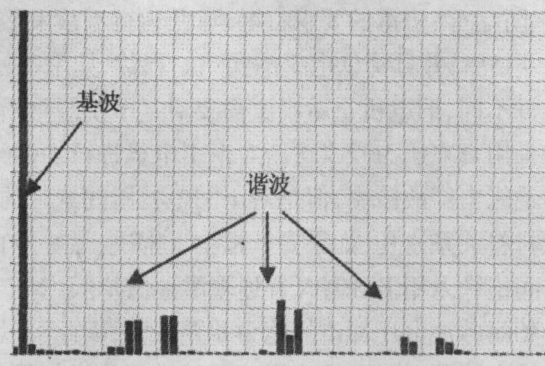


图3 AWO状态下 20 km·h⁻¹电流频谱图

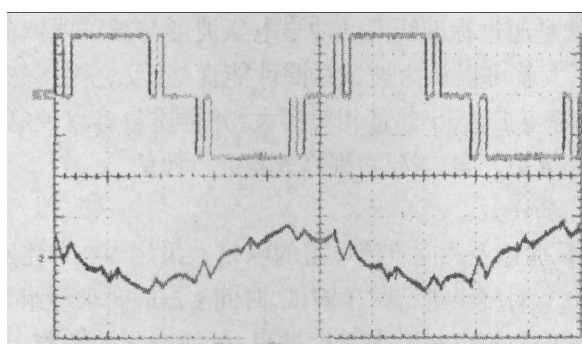


图4 AWO状态下牵引工况 70 km·h⁻¹电压电流波形

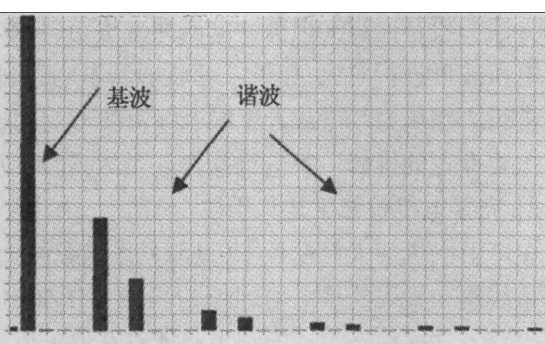


图5 AWO状态下 70 km·h⁻¹电流频谱图

在牵引电机定子绕组在通风槽口、线圈直线出槽口处以及绕组端部,电场比较集中,当局部位置场强达到一定数值时,气体发生局部电离,产生电晕现象。电晕产生热效应和臭氧、氮的氧化物使线圈内局部温度升高,致使绝缘老化、破损、腐蚀。从一号线牵引电机的烧损现象来看,几台电机烧损位置十分相近,均位于绕组通风槽直线出槽口处,线圈和定子铁芯电腐蚀严重,如图6所示,同属于匝间绝缘击穿,绝缘击穿后短路大电流发热烧损对地绝缘而使电机对地短路,引发火花放电,致使线圈和定子铁芯电腐蚀严重,转子表面有环状烧痕而匝间绝缘的击穿就很有可能是匝间绝缘逐渐老化的情况下,发生电晕,绝缘逐渐损坏直至击穿。因此,综合考虑定子线圈直线出槽口处的通风条件、绕组匝间绝缘材料、发热情况、电场强度等因素,一号线牵引电机定子绝缘薄弱区域很有可能就位于定子绕组直线出槽口处。

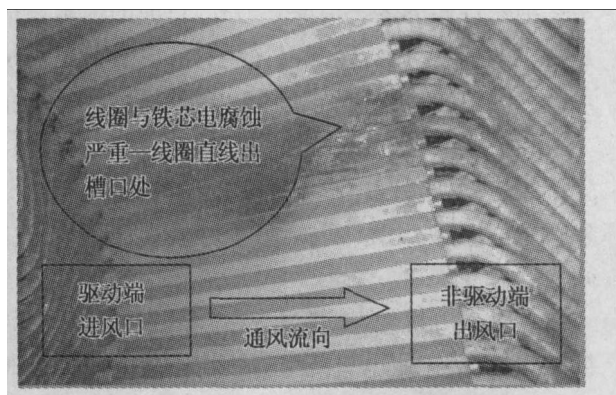


图6 一号线牵引电机定子烧损图片

2 牵引电机烧损的对策

为了降低牵引电机烧损故障率,从广州地铁牵引电机架、大修工作的实际情况出发,可以采用以下方案解决。

1) 对一号线牵引电机重新进行真空压力浸漆(VPI),或者进行绝缘升级。

为了提高大中型电机质量和可靠性,现在均采用真空压力浸漆工艺,将电机的定子、转子先放到烘炉内预热,然后在浸漆罐内抽空空气,再把浸渍漆输入罐内,浸没电机,用氮气在液面上加一定的压力,利用浸渍漆的毛细作用,以实现均匀浸漆,最后再送到烘炉,在一定的温度条件下,使电机的绕组和铁芯固化成一体。其主要优点如下:(1) 增强绕组的机械强度;(2) 增强绕组层间、匝间的绝缘强度;(3) 达到三防即

防潮、防盐雾、防霉的要求;(4)降低运行温度和温升;(5)提高绝缘导热性以及电机的出力,一般可提高10%~15%,并且降低电机的噪声。当然,如果一号线牵引电机进行重新浸漆,其浸漆前的预备工作跟新制电机不同,旧电机重新浸漆需要对定子绕组重新进行严格地清洁除漆,以保证浸漆效果。

采用真空压力浸漆重新对牵引电机进行加强绝缘,可以在一定程度上降低定子绝缘老化导致可能引发的绝缘击穿故障率,但是对于旧电机匝间绝缘的改善有限,匝间绝缘主要跟电机制造工艺以及所使用的绝缘材料关系密切,如果要从根本上解决,最好最直接的办法就是对匝间绝缘进行升级。一号线牵引电机的匝间绝缘采用KAPTON普通聚酰亚胺薄膜,对于200级(N级)变频牵引电机,相比于KAPTON FCR的耐电晕和耐脉冲电压冲击的能力相差较大,因此可以选用耐电晕能力更强的绝缘材料升级匝间绝缘。比较折中的方法可以对匝间绝缘薄弱处进行绝缘加强或升级,但是如何判断匝间绝缘薄弱点的位置非常棘手,需要将定子绕组分解,然后对各个线圈进行检测,从而判断匝间绝缘薄弱点的位置。比较常用的匝间绝缘检测方法一般是通过无损脉冲电压冲击法,其基本原理就是通过标准线圈的冲击电压波形与被试线圈的冲击电压波形进行对比,如果二者波形基本吻合,偏差不大就可以认为被试线圈性能良好,反之则不然。由于进行真空压力浸漆或者绝缘升级需要专门的操作设备与工艺,工作量相对很大,并且质量难以控制,因此需要专业的维修厂家进行操作。当然,如果使用以上维护方案,需要对维修成本进行评估。

2) 完善电机检修工艺与手段。

在牵引电机架大修过程中,目前只作绝缘测试、耐压试验以及相间直流电阻的测量。采用500 V兆欧表测量绕组与机壳绝缘电阻,要求大于 $2\text{ M}\Omega$,50 Hz,2 700 V对绕组进行耐压测试,时间1 min,要求绕组无短路击穿。这样静态测试的结果都能符合要求值,但是无法模拟电机动态运行过程,包括变化的负载、频繁的起停、多向的振动等等。因此目前的检修手段,无法对电机的绝缘性能作出全面、细致地评估,也无法掌握绝缘性能的老化情况。另外,目前的检修只是对两相之间的静态电阻进行了测量,而牵引电机本身就是很大的感性负载,因此仅凭测量的电阻值来判断定子绕组三相平衡是不够准确的,只有综合考虑阻抗相角等参数才能比较准确地判断电机的静态电气性能。

为了实现牵引电机运行状态的全面监测与预测维修,需要完善与改进现有的检修手段。因此,在较为完善的检修设备与技术条件下,通过测试表征牵引电机运行状态的关键参数,例如三相电压、电流、直流电阻、阻抗、电感、相角、对地绝缘、介质损耗、吸收比等,从而利于评判绕组匝间品质并且发现早期微小的匝间短路。

在牵引电机架、大修过程中,可以参照以下标准进行。GB 50150-2006《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》规定电机绕组吸收比不应低于1.2,相间直流电阻差别不应超过其最小值的1%;GB/T 15543-1995《三相电压允许不平衡度》规定了电力系统公共连接点正常电压不平衡度允许值为2%,短时的不平衡度不得超过4%,另外,牵引电机绕组匝间短路产生与发展的过程,即是电感失效、电磁特性变化的过程。该变化可以通过 I/F 值表征,理想值为-50%,可以通过特定仪器进行测量。表1为美国能源部及IEEE的电机参数评判标准。该标准认为,阻抗测试较直流电阻的测试更精确, I/F 用于评估故障源于定子还是转子,且能够诊断早期匝间短路等故障。如今这一标准已成为美国能源部推荐的电机质量评判依据。表中数据为三相绕组任意两相之间绕组参数测量值的偏差,例如当任意两相之间阻抗偏差大于等于5%,则可判定该电机存在绕组故障。

表1 IEEE电机三相不平衡评判标准

绕组参数	良好	缺陷	故障
电感 L/mH	5 %	10 %	15 %
阻抗 Z/Ω	2 %	3 %	5 %
$(I/F)/\%$	0	2	>2
相角 $F_i/(\circ)$	0	1	2

总之,通过完善与改善牵引电机检测手段,对电机运行过程中的各关键参数进行定期监控,将有助于

对其状态的全面评估,将电机烧损的风险降低到最小。

3 结论

一号线牵引电机绝缘系统的老化不可避免。电机的烧损是由端电压过冲、发热损耗、空间电荷以及电磁激振力的综合作用导致的,并且以上各种因素活跃的主要区域很可能就位于绕组直线出槽口处。因此有必要完善牵引电机架在大修过程中的检修手段以及对定子绝缘采取补救措施,特别是对匝间绝缘进行加强。与此同时,采用比较可靠的检测手段对一号线牵引电机进行全面的绝缘性能评测,对存在问题的电机采取相应的措施。

参考文献:

- [1] 陆宝琦. 交流变频电机的绝缘[J]. 绝缘材料, 2001, (3): 29 - 34.
- [2] 何恩广. 交流传动机车变频调速牵引电机绝缘破坏机理及对策研究[R]. 北京: 清华大学, 2003.
- [3] 何恩广, 陈红生, 刘学忠, 等. 变频交流牵引电机绝缘系统新构想[J]. 电力机车技术, 2002, (3): 17 - 19.
- [4] 李益丰. 异步牵引电机绝缘系统探讨[J]. 绝缘材料通讯, 1996, (5): 5 - 7.
- [5] 马洪飞, 徐殿国, 陈希有, 等. PWM 逆变器驱动异步电动机采用长线电缆时电压反射现象的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, (11): 109 - 113.

An Analysis of Traction Motor Burning for Guangzhou Metro Line 1 and Its Countermeasures

CHEN Wei

(Rolling Stock Center, Guangzhou Metro General Corporation, Guangzhou 510380, China)

Abstract: Five burning failures of traction motor happened for Guangzhou Metro Line 1 in recent two years. Failure includes breakdown of the stator winding insulation, serious corrosion of coil and the stator core, ring burning marks on the surface of the rotor toward the burning place of stator winding. This paper, aiming to the Line 1 of traction motor burning failure, analyzes and puts forward some countermeasures.

Key words: traction motor; insulation breakdown; vacuum pressure impregnation

(责任编辑:刘棉玲)