

变频牵引电机定子绕组绝缘老化特性研究

雷平振, 樊洁心, 刘冠芳, 李斌寅, 牛玉龙
(中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 对比测量了不同运行年限的变频牵引电机的定子绕组绝缘诊断参数, 包括绝缘电阻、介质损耗因数、局部放电起始电压(PDIV)、剩余击穿电压等特征参数, 以及沿绕组不同部位的绝缘材料取样进行了热失重分析(TGA)来研究绝缘老化特征。介电性能测量结果表明, 与新电机相比, 运行后定子绕组的绝缘介电性能有不同程度的下降, 出槽口附近绝缘的老化程度高于槽内。TGA 分析结果表明, 使用了长达 10 年的牵引电机定子绕组绝缘性能略有下降, 且线圈下层边的绝缘老化比上层边明显。

关键词: 变频牵引电机; 定子绝缘; 绝缘老化; 绝缘试验

中图分类号: TM 922.71 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0033-05

doi: 10.12177/emca.2020.038

Research on Stator Winding Insulation Deterioration for Inverter-Fed Traction Motors

LEI Pingzhen, FAN Jiexin, LIU Guanfang, LI Binyin, NIU Yulong
(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: The characteristic parameters of the stator winding insulations in the inverter-fed traction motors with various service years, including the insulation resistance, dissipation factor, partial discharge inception voltage (PDIV) and residual breakdown voltage, are measured sequentially to analyze the insulation deterioration. The insulation materials from different sites of the insulation along the windings are sampled and analyzed with thermogravimetric analysis (TGA). The measured dielectric results show that the characteristic parameters from the stator windings decrease slightly in comparison with those of new motors. The aging degree of the insulation near the outlet slot is higher than that in the slot. Besides, the TGA results from the sampled insulation materials indicate that the stator winding insulation in the inverter-fed traction motor with a service period up to ten years shows slight deterioration. Generally, more serious deterioration in the insulation tends to appear at the bottom side of the motor coils.

Key words: inverter-fed traction motor; stator insulation; insulation deterioration; insulation test

0 引言

逆变器供电的牵引电机定子绝缘系统在运行期间会受到高频脉冲电应力、热应力、机械应力和环境应力的影响^[1-2], 这些应力的综合作用会使定子绕组的绝缘性能降低, 并最终导致绝缘故障。评估牵引电机中定子绕组绝缘的状况, 确定定子绕组绝缘中的最高应力的位置, 针对性制定维护

措施, 对减少变频牵引电机的故障率、提高电机可靠性和降低电机维护成本具有重要的意义。

许多研究者对变频牵引电机进行了老化试验, 评价老化过程的特征参数, 包括绝缘电阻、吸收比、泄露电流、介质损耗因数、电容、局部放电起始电压(PDIV)和剩余击穿电压, 经研究发现, 绝缘系统热老化后, 线圈绝缘的介质损耗因数将增加^[3-5]。随着老化时间的延长, 牵引电机定子线

收稿日期: 2020-03-03; 收到修改稿日期: 2020-04-16

作者简介: 雷平振(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机设计及电机基础技术。

圈的绝缘电阻和 PDIV 将显著降低^[6-7]。这些研究成果可为变频电机的绝缘状态监测、故障预测和寿命评估提供数据和理论支持,但是这些研究的对象是定子模拟线圈或双绞线,并且大多数试验条件均不是多因子老化,与实际电机运行条件有一定差别。此外,由于电机在使用过程中沿绕组的电应力分布不均匀,不同位置的线圈老化程度不同,因此确定电机的薄弱部位,然后进一步补强这些重要部位的绝缘^[8]。

本文对不同运行时间的检修牵引电机定子线圈进行了绝缘电阻、介质损耗因数、PDIV 以及剩余击穿电压测试,并结合电机绝缘系统中绝缘材料的热失重分析(TGA),综合评估变频牵引电机定子绕组的绝缘状态和老化特性。

1 试样和试验方法

1.1 试样及测试条件

本文以不同运行时间返厂检修的 4 台变频牵引电机的定子绕组为对象进行试验和分析研究,其中包括 3 台运行中的故障电机和 1 台新电机。电机的额定电压为 2 kV,额定功率为 560 kW,定子绕组绝缘系统采用有机硅绝缘材料。定子绕组每个线圈有 8 匝导线,导线的位置分布如图 1 所示。

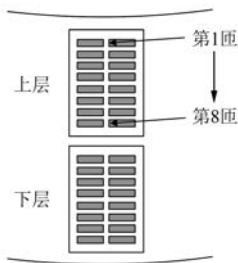


图 1 牵引电机定子线圈结构截面示意图

电机的试样编号及其运行时间如表 1 所示。试验前首先将定子绕组各线圈端部绕组切断,由于潮湿对绝缘检测结果的环境影响比较大,因此在试验前对试样进行干燥。然后在室温环境条件(温度 25~30 ℃及相对湿度 70%)和直流 1.0 kV 电压下测量线圈上、下层边的绝缘电阻,在工频 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 kV 电压下,分别对线圈上、下层边进行介质损耗因数测试,在局部放电量达到 20 pC 时进行 PDIV 测量。最后分别对线圈上、

下层边进行了交流击穿试验(电压上升速率为 500 V/s)。在线圈上层边先进行击穿试验后,为了给线圈下层边的击穿试验留出空间,将线圈上层边拆除或端部完全切除。每个线圈的击穿位置记录为绝缘的最薄弱点。此外,还准备了一些经过 260 ℃/1 728 h 人工加速热老化试验后的定子试样进行对比试验。

表 1 试验电机试样编号及运行时间

试样编号	M-1	M-2	M-3	M-4
运行时间/a	10	7	5	0

1.2 线圈绝缘材料的取样

为了分析牵引电机线圈槽内和出槽口位置的绝缘老化程度,在电机同一位置,分别从 M-4 新绕组线圈、人工加速老化(经 260 ℃/1 728 h 老化后)的线圈和 M-1 最长使用 10 年后的电机线圈中,取对地(主)绝缘结构中的聚酰亚胺薄膜作为试验样品,并进行 TGA,以反映材料的热分解特性。为了避免对材料的原始老化状态造成影响,试样均在剩余击穿电压试验前取样,编号为 P-1、P-2、P-3 和 P-4。聚酰亚胺薄膜样品及其相应的处理条件和位置如表 2 所示。

表 2 绝缘材料取样位置及状态

试样编号	P-1	P-2	P-3	P-4
位置	槽内	槽内	出槽口	槽内
线圈状态	新绕组	260 ℃/1 728 h 热老化后		运行 10 年后

2 试验结果及分析

2.1 老化特征参数的试验结果分析

2.1.1 绝缘电阻及吸收比

在室温下测量 4 台变频牵引电机定子线圈的绝缘电阻,其绝缘电阻及吸收比平均值如表 3 所示。

表 3 线圈的平均绝缘电阻和吸收比测试结果

样品编号	位置	M-1	M-2	M-3	M-4
绝缘电阻/GΩ	上层	455	>2 500	1 100	639
	下层	354	1 700	619	1 010
吸收比	上层	1.78	—	2.36	2.42
	下层	1.56	1.64	1.95	2.57

从表 3 可以看出,新电机线圈的平均吸收比

大于运行后的电机,且随运行时间增加而减小,反映出绝缘系统老化的一致趋势。新电机线圈上层边的吸收比小于线圈下层边,而运行后电机恰恰相反,由此反映运行后电机线圈下层边的老化略高于上层边,这是因为牵引电机采用通风冷却,运行时线圈下层边的温度应高于上层边,其热应力大于线圈上层边的热应力,所以绝缘劣化程度稍大。

新电机 M-4 和运行 10 年后电机 M-1 各线圈上层边的吸收比分布如图 2 所示。

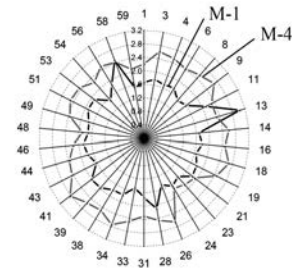


图 2 M-1 和 M-4 电机线圈上层边吸收比分布

从图 2 可以看出,运行 10 年后线圈上层边的吸收比分布比新电机的吸收比更分散。其他运行时间的电机中,上层和下层的其他线圈的情况与图 2 中 M-1 电机线圈上层边的情况大致相同。电机绕组不同部位线圈的绝缘状态有不同程度的劣化,这是由于运行中变频器输出的高频方波脉冲电压在电机绕组中的分布不均匀,同时电机中每个部位承受的热应力、机械应力以及环境应力不同,运行后每个绕组的绝缘老化程度不同。

2. 1. 2 介质损耗因数

在工频交流电压下,测量得到 M-3 和 M-4 电机定子绕组的平均介质损耗因数,如图 3 所示。

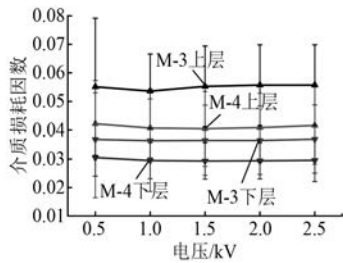


图 3 M-3 和 M-4 线圈介质损耗因数与试验电压的关系

新电机线圈上层边的介质损耗因数比线圈下层边略高约 0.01,因为上层线圈与铁心的接触面积小,受测试环境中相对湿度的影响比较大,所以

介质损耗因数略高。使用 5 年后,M-3 电机线圈上、下层边的介质损耗因数均有不同程度的升高,但未出现明显的介质损耗因数增量,说明牵引电机绝缘系统在高温运行后,绝缘聚合物内的某些化学键就会断裂,与氧气分子结合发生氧化反应,在绝缘中产生更多的极性分子,使绝缘逐渐脆化,介质损耗因数不断增大。

2. 1. 3 PDIV

新电机和运行后电机线圈的平均 PDIV 值和局部放电相位如表 4 和图 4 所示。从表 4 可以看出,不同运行年限后线圈的平均 PDIV 值均比新电机低了 0.5~0.7 kV。从图 4 可以看出,新电机的局部放电类型为主绝缘内部,而运行后局部放电类型为槽口放电和绕组端部放电,这是由于电机运行过程中槽口受热应力和机械振动应力的影响,使得槽口绝缘层与铁心之间的产生气隙,导致槽口产生局部放电,而端部在运行环境中受到潮湿和油污的影响,出现放电现象。

表 4 线圈的局部放电起始电压测试结果

样品编号	位置	M-1	M-2	M-3	M-4
PDIV/kV	上层	2.5	2.4	2.5	3.0
	下层	2.5	2.3	2.3	3.0

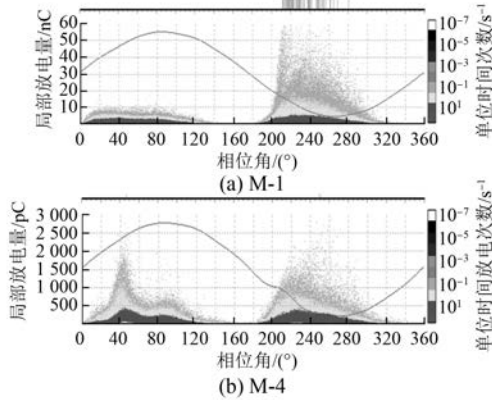


图 4 变频牵引电机线圈局部放电相位图

同一运行时间电机线圈上层边的平均 PDIV 值高于线圈下层边最大值约 0.2 kV。这是由于线圈下层边的热应力大于线圈上层边的热应力,导致线圈下层边的绝缘老化更加明显。

新电机 M-4 和运行 7 年后电机 M-2 各线圈下层边的 PDIV 分布如图 5 所示。新电机 M-4 定子线圈的 PDIV 均在 2.5 kV 以上,上下层线圈无明显

显差别。但在使用 7 年后,上下层线圈的 PDIV 有不同程度的下降。下层线圈的 PDIV 比上层线圈有所减小。

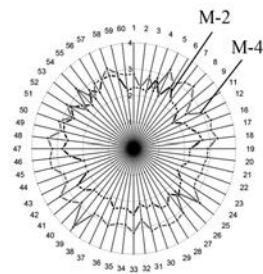


图 5 M-2 和 M-4 电机线圈下层边 PDIV 分布

M-2 电机少数下层线圈的 PDIV 低于电机最大峰值电压 2.0 kV,在电机后期运行中,这些线圈会产生局部放电,成为故障隐患。

2. 1. 4 击穿电压

线圈的平均击穿电压测试结果如表 5 所示。

表 5 线圈的平均击穿电压测试结果

样品编号	位置	M-1	M-2	M-3	M-4
击穿电压/kV	上层	—	26.2	26.1	25.0
	下层	—	25.2	25.8	26.0

新电机 M-4、运行 5 年电机 M-3 和运行 7 年电机 M-2 各个线圈的工频击穿电压分布在 20 ~ 30 kV 范围内。由表 5 可知,3 台电机定子线圈平均击穿电压的最大差值不大于 1 kV,仅为击穿电压的 3% ~ 5%,说明定子绕组在使用不到 10 年的时间内,对地绝缘的介电强度没有明显的降低。

新电机的线圈上层边的击穿电压比下层边的击穿电压低了约 1 kV,而 M-2 和 M-3 电机的情况则正好相反。说明在运行过程中,线圈下层边承受的热应力和机械应力比上层略大,因此线圈下层边绝缘更容易老化。

2. 1. 5 击穿电压位置

电机线圈击穿电压试验后,击穿点在电机中的位置分布统计如表 6 所示。

从表 6 可以看出,绝大多数故障位置均在槽口附近,槽口是电机运行过程中电、热、机械和环境应力的集中区域。2/3 的故障位置位于非传动端(更易受潮和污染的冷却空气入口)。大部分的击穿位置位于槽端的边缘(占 66.8%),其余是线圈的外侧(19.8%)和内侧(13.4%)。这是因为

表 6 工频击穿点位置统计

定子端部位置	传动端		非传动端
比例/%	33.3		66.7
线圈位置	槽口边缘	线圈内侧	线圈外侧
比例/%	66.8	19.8	13.4
匝数	1~2	7~8	其他
比例/%	53.5	22.0	24.5

运行中槽口边缘的电场强度高于槽的其他区域,所以绝缘的电老化更明显。经过线圈的失效位置的拆解,发现 53.5% 的击穿位置在线圈的 1 匝或 2 匝处,这里由于变频驱动时线圈首端匝间脉冲电压大于其他匝间^[9]。

2. 2 绝缘材料热分析

在变频牵引电机的运行过程中,定子线圈在槽内部位受到热应力的影响比较大,定子线圈槽口位置受到电应力、机械和环境应力的影响比较大。这些应力作用会使线圈的不同部位的绝缘材料(如线圈主绝缘中的聚酰亚胺薄膜)的老化程度不同。聚酰亚胺薄膜的分子结构在老化后会发生变化,可以通过热稳定性来衡量。对表 2 的新电机、人工加速热老化和运行 10 年电机后电机线圈及其不同位置的主要绝缘材料聚酰亚胺薄膜进行 TGA 试验,结果如图 6 所示。

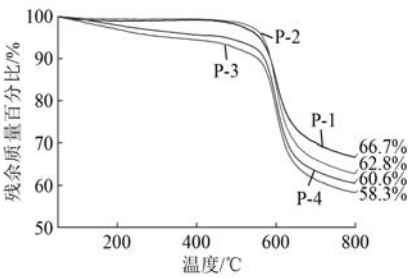


图 6 聚酰亚胺薄膜残余质量百分比与温度的关系

从图 6 可以看出,温度在 550 °C 以下时试样 P-1 和 P-2 的残余质量百分比高于 P-3 和 P-4,说明温度在 550 °C 以下时 P-1 和 P-2 试样的热稳定性优于 P-3 和 P-4 试样。在 800 °C 时,P-1、P-2、P-3、P-4 的残余质量百分比分别为 66.7%、62.8%、58.3%、60.6%,说明在 800 °C 时聚酰亚胺薄膜的最终残留率随老化程度增加而降低,其中同一运行时间的电机定子线圈出槽口处试样 P-3 比槽内试样 P-4 更低,进一步表明绝缘材料在出

槽口处的老化程度比槽内的略高。

3 结 语

根据电机线圈的老化特征参数的试验结果和对绝缘材料的劣化分析,得出如下结论:

(1) 变频牵引电机在运行 10 年后与新电机相比,绝缘电阻、吸收比和 PDIV 降低,介质损耗因数增大,说明通过非破坏绝缘性能测试可以反映绝缘老化的状态。

(2) 在 800 °C 时聚酰亚胺薄膜 TGA 的最终残留率在老化后会降低,说明通过对有机绝缘材料的 TGA 可以反映绝缘的老化状态,由于这样的测试需要破坏绝缘,可以在故障分析时使用。

(3) 击穿电压试验结果表明,绝大多数击穿位置在出槽口附近,线圈的第一匝或第二匝处,这与该处电场强度较高有关,因此对槽口绝缘进行补强,可以提高电机运行的可靠性。

【参考文献】

- [1] DING X, LIU X, ZHANG J, et al. Study on multi-factor aging characteristics of stator insulation for wind turbine generator[C]// 2012 IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, 2012.
- [2] PANAGIOTOU P A, GYFTAKIS K N, LOPHITIS N, et al. Investigation of traction motor windings' insulation capacitance at switching frequencies under accelerated thermal stress[C] // 2017 IEEE 11th

International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2017.

- [3] 何景彦, 吴广宁, 高波, 等. 基于介质损耗分析研究变频电机绝缘老化特性[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 243.
- [4] 马勇, 韩斌, 周国栋. 风力发电机绝缘状态评估模型[J]. 大电机技术, 2019(6): 7.
- [5] ZOELLER C, VOGELSBERGER M A, FASCHING R, et al. Evaluation and current-response based identification of insulation degradation for high utilized electrical machines in railway application[C] // 2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2015.
- [6] 于钦学, 任文娥, 钟力生, 等. 热老化对变频牵引电机电磁线绝缘电性能影响的研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(1): 93.
- [7] 张国钦. 基于非破坏性参量的变频牵引电机绝缘老化的试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [8] HAN J, LIU X, ZHAO Y, et al. Experimental study on deterioration characteristics of winding insulation state in double-fed wind generator[C] // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2019.
- [9] HWANG D H, LEE K C, JEON J W, et al. Analysis of voltage distribution in stator winding of IGBT PWM inverter-fed induction motors[C] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005.

(上接第 21 页)

- [11] 张立伟, 李行, 宋佩佩, 等. 基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 70.

- [12] 闫晓宏, 王伟. 基于改进锁相环型 PMSLM 无传感器控制[J]. 微特电机, 2018, 46(12): 62.

《电机与控制应用》新网站启用

为了更好地服务于作者和读者,《电机与控制应用》建设了新的网站。服务升级,内容丰富,域名不变,仍为 www.motor-abc.cn。

新网站设有网刊系统。2018 年至今《电机与控制应用》发表的所有论文均可通过该系统检索、阅读、下载。

新网站同时开通了移动版。关注《电机与控制应用》微信公众号(djykyzy),即可在移动端阅读最新论文、查询稿件处理状态,并可登录投稿系统进行其他操作。

请扫码关注《电机与控制应用》微信公众号:

