

变频电机绝缘系统老化试验方法的研究进展

郭 琪, 刘冠芳

(中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710016)

摘 要: 对变频电机绝缘系统老化的原因和现象进行了介绍, 总结了绝缘系统热老化、脉冲电老化、环境老化及多因子老化的试验标准和试样方法, 指出现阶段试验方法中存在的问题, 提出今后的发展趋势。

关键词: 变频电机; 绝缘系统; 老化

中图分类号: TM 303.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0013-04

Research Progress on Aging Performance of Insulation System for Inverter-Fed Motor

GUO Qi, LIU Guanfang

(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: The causes and phenomena of variable frequency motor insulation aging system were introduced. The test standards and test methods of thermal aging, pulse electrical aging, environmental aging and multi factor aging were summarized, pointed out the existing problems in the stage of test method, put forward the development trend in the future.

Key words: inverter-fed motor; insulation system; aging

0 引 言

近年来,随着电力电子器件及其技术的迅速发展,大功率高速开关器件在高速动车组、大功率机车、变频调速系统及风力发电机中得到了广泛应用。变频电机因变频器产生的脉冲波有着高耸的尖峰电压和陡峭的上升时间,加上可变或极高的频率(最高达到 20 kHz),从而会对电机绝缘体系产生极大的破坏,使得局部放电量增大,产生局部高温,空间电荷急剧增加,加速了变频电机绝缘结构的老化,缩短了电机的使用寿命。由于 PWM 电应力对绝缘寿命的影响较正弦工频电应力更严重,所以针对直流和正弦工频电应力环境下的绝缘寿命评估方法和试验设备已不能完全适用于以 PWM 技术为基础的脉冲电应力下绝缘的寿命评估。

绝缘系统是电机的重要组成部分,其性能优劣直接影响到电机的安全性、可靠性和使用寿命,

因此各行业开始关注变频电机的绝缘寿命,高校和企业纷纷进行了热老化、脉冲电老化、环境老化和多因子老化的研究。本文对各种老化试验方法和标准进行了总结,说明了绝缘系统老化试验方法的现状及存在的问题,探索了未来的发展趋势。

1 绝缘系统老化的原因与现象

电机在长期运行后绝缘性能渐趋劣化,绝缘系统的老化是各种劣化的综合表征。造成电机绝缘系统老化的因素很多,统称为老化因子,其中主要的老化因子有热、电压、机械力和环境等,各老化因子对绝缘性能的影响表现如表 1 所示。在这些因子综合作用下,绝缘系统产生了各种老化现象。据统计表明,服役期限 20 年以上的电机,绝缘故障发生的几率显著上升,许多绝缘故障与老化一起发生。

表 1 各种老化因子对绝缘性能的影响表现

序号	老化因子	表现形式	老化现象
1	热	连续	挥发、枯缩、化学变质、机械强度降低、散热性能变差
		冷热循环	离层、龟裂、变形
2	电压	运行电压	局部放电腐蚀、表面漏电灼痕
		冲击电压	树枝状放电
3	机械力	振动	磨损
		冲击	离层、龟裂
		弯曲	离层、龟裂
4	环境	吸湿	泄漏电流增大、
		结露	形成表面漏电通道
		浸水	和炭化灼痕
		导电物质污损	
		油、药品污损	侵蚀和化学变质

2 绝缘系统老化试验研究

2.1 热老化

现阶段绝缘系统的热老化即热评定的方法已经很成熟,可以参考的国际标准有 UL1446、IEEE1776、IEC61857-1、IEC60034-18-31,国内标准有 GB17948.3、GB/T20111.1,试验规程如图 1 所示。IEEE1776 中明确给出了不同耐热等级的试验温度、周期,试样的模型尺寸和试验结果的判定都比较明确。

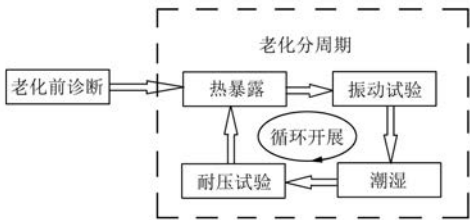


图 1 热评定试验规程

热老化试验通常用来评定绝缘材料和结构的耐热等级,适用范围很广,用户还可以根据产品的特殊要求在热老化过程中增加或减少老化因子。曹燕飞等^[1]在两种有机硅绝缘系统热老化过程中增加尘埃暴露试验,得到了两种结构的耐热指数。于钦学等^[2]研究了热老化对变频牵引电机电磁线绝缘电性能的影响,在 300 ℃ 下进行了 244 h 的热暴露,分析介质损耗因素、电容、电流增量、绝缘电阻及击穿电压等随老化时间的变化规律。张依

强等^[3]研究了不同温度下电磁线的失效时间和击穿电压,并探讨了电磁线的介质损耗温度谱。

2.2 脉冲电老化

变频电机采用 PWM 驱动技术,输出的波形是具有陡上升和下降沿的方波脉冲电压。由于电机、电缆的阻抗不匹配,产生很大的过电压,而这个过电压在电机绝缘中电压分布不均匀,因此导致电机绝缘过早失效。目前我国对绝缘系统的高频老化寿命问题缺乏足够的认识,国内外对高频电老化寿命评估方法还存在争议,没有统一的试验标准。

2.2.1 电磁线脉冲电老化

变频电机的匝间故障比较多,因此国内对电磁线脉冲电老化的研究很多,尤其是对使用耐电晕薄膜的电磁线,但试样和试验方法不尽相同。

(1) 试样的制备。朱勇穗等^[4]在 YQ200 牵引电机线圈绝缘结构的电性能分析中对 FCR 薄膜 53% 叠包、厚度为 0.23 mm 的电磁线进行了研究,试验模型如图 2(a) 所示。何景彦等^[5]以 FCR 薄膜 2/3 叠包、厚度为 0.21 mm 的电磁线为研究对象,试验模型如图 2(b) 所示。

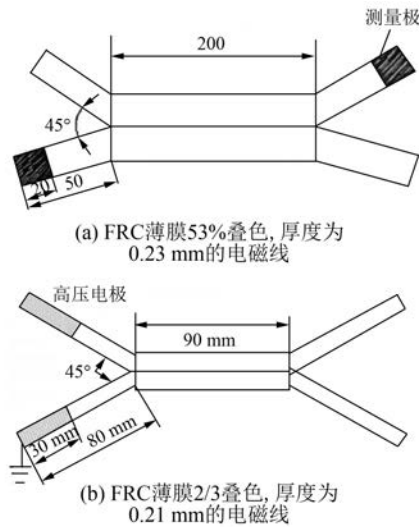


图 2 脉冲试验模型电老化

两者除了试验模型尺寸差异外,在模型的绝缘处理方面也不同。前者在 2 根电磁线外面首先用聚四氟乙烯薄膜半叠包一次,再用白布带扎紧;后者在 2 根电磁线外面首先用薄膜补强的云母带半叠包 2 次,然后再用玻璃丝带平包一次。不同的绝缘处理方式都是为了防止绝缘漆流失,但是

这两种结构在 45° 的拐角处容易产生气隙, 气隙放电导致绝缘失效。因此, 朱勇穗等^[6] 在变频电机匝间绝缘研究中对 45° 的部分增加了绝缘泥填充。

(2) 试验方法。变频电机脉冲电老化可参考的试验标准较少, 主要有 IEC60034-18.41 (GB/T22720.1—2008)《电压型变频器供电的旋转电机 I 型电气绝缘结构的鉴别和型式试验》和 IEC60034-18.42《电压型变频器供电的旋转电机 II 型电气绝缘结构的鉴别和型式试验》两个标准。影响试验结果的参数有试验温度、试验电压、试验频率、占空比、上升沿时间、下降沿时间、电源极性等, 而标准中未给出明确的试验参数。

任文娥等^[7] 研究了脉冲电源的电压幅值、脉冲频率及温度对变频电机电磁线试样寿命影响规律, 试验结果表明: 电机线圈寿命随电压幅值和温度的增加成指数性衰减, 而在 $13 \sim 20$ kHz 范围内, 试样寿命与频率成负线性关系; 在老化条件相同时, 同批次试样的寿命分散性比较大。

2.2.2 绝缘结构脉冲电老化

(1) 试验模型。绝缘结构试样与电磁线的基本相同, 为了保证高压试验时不发生沿面闪络, 要求槽外部分应留足够的长度。模拟铁心长度不易太长, 如果电容太大, 脉冲试验仪器的容性负载容量和上升时间可能无法满足。

(2) 试验参数的选择。在脉冲电老化试验中最重要的加速因子是试验电压, 其他参数可以按照实际运行的参数进行设置。IEC60034-18-42 标准要求试验电压数量不少于 3 个; 试验电压应该选择平均失效时间在 $100 \sim 3\,000$ h 的范围内。刘学忠等^[8] 在兆瓦级风力发电机绝缘的重复脉冲电老化寿命评定方法中给出了 $4.0U_{\Phi P}$ 、 $3.0U_{\Phi P}$ 以及 $2.5U_{\Phi P}$ ($U_{\Phi P}$ 是指变流器的最高脉冲尖峰电压幅值) 3 个试验电压, 分别进行 100、1 000、5 000 h 的试验。

潘庆辉等对风力发电机定子线圈进行了高频脉冲电老化性能研究, 测试电压为 5 kV, 测试频率为 1 kHz, 测试温度为室温, 脉冲上升时间为 580 ± 20 ns, 进行了 1 500 h 的电老化, 得到了介质损耗因数、吸收比、绝缘电阻及起始放电电压的变化规律。试验结果虽然得到了定子线圈的寿命, 但是由于测试温度是室温, 因此与实际运行情况

是不符的。

2.3 环境老化

随着电机运行的范围越来越广, 环境对电机绝缘系统的影响越来越大, 常见的几种环境试验为低温、温度交变、湿热、盐雾、低气压等。

2.3.1 试验模型

一般情况下, 绝缘系统很少对单一的环境老化因子进行试验, 因此试验模型也没有统一的标准。通常情况下建议采用类似图 2 的试验模型, 模拟铁心的长度约 200 mm。

2.3.2 试验方法

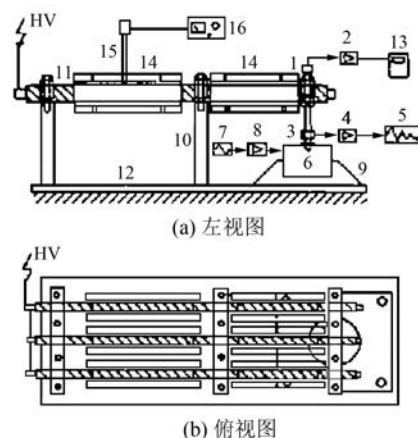
环境试验条件通常参照 GB2423 电工电子环境试验标准进行, 而标准中虽然给出了推荐试验的时间, 但是未给出试验结果的评定方法, 因此还需要根据实际产品的情况进行试验。于钦学等^[9] 研究了冷热循环老化对电机电磁线电性能的影响, 共进行了 280 个周期的试验, 结果证明电磁线的电性能参数变化相对较小。这说明单一的环境老化因子试验时间太短, 对绝缘系统的影响不大。

2.4 多因子老化

电机在运行中耐受的不仅是电和热, 还会受到环境的影响, 因此多因子的老化更能反映电机绝缘系统的性能。

2.4.1 试验模型

张晓虹等^[10] 对大电机电-热-机械应力多因子老化试验系统的试样进行了设计, 如图 3



1—传感器探头; 2—电涡流传感器; 3—加速度传感器; 4—电荷放大器; 5—示波器; 6—J电激励振器; 7—正弦波信号发生器; 8—功率放大器; 9—升降架; 10—试样固定和支撑架; 11—试样; 12—振动台; 13—位移测量仪; 14—电加热板; 15—热电偶; 16—温度控制仪。

图3 电-热-机械应力联合老化试验系统示意图

2.4.2 试验方法

多因子的选择可以根据电机绝缘系统在实际运行中的情况来确定。如刘学忠^[11]等人调查了海上风力发电机运行的环境气候条件,制作了模拟 5 MW/3 kV 级定子绕组绝缘系统试样,在实验室进行了温度变化、恒定湿热和持续盐雾的加速海洋环境模拟试验;DING X X 等^[12]对风力发电机绝缘系统进行了基于电热和冷热循环等多因子加速老化试验研究。

3 结 语

近年来,随着变频电机的广泛应用,变频电机老化试验方法的研究也得到了发展和进步。但老化试验的目的是检验绝缘系统长期耐受老化因子的能力,并不能得到绝缘系统的寿命。当前,热老化试验标准和评定方法已经非常成熟,按照标准方法进行试验就能够得到绝缘系统的耐热等级;脉冲电热老化没有成熟的方法,研究的人比较多,主要集中在电磁线的老化上。由于试验设备的差异,导致脉冲电热老化试验结果无法对比,因此未来要通过大量的试验对设备和试验参数提出严格的要求,才能制定可行的试验方法。随着电机使用环境的多样化,未来多因子老化成为电机绝缘系统考核的发展方向,具体的试验方法可根据电机运行情况来制定。

【参考文献】

- [1] 曹燕飞,梁西川,陈红生,等.两种有机硅绝缘系统热老化性能及寿命对比分析[J].绝缘材料,2015,48(4): 25-29.
- [2] 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): 93-96

- [3] 张依强,罗杨.温度对变频牵引电机用电磁线绝缘特性的影响[J].绝缘材料,2013,46(6): 66-70.
- [4] 朱勇穗,张敬龙.YQ200 牵引电机定子线圈绝缘结构的电性能分析[J].绝缘材料,2011,44(2): 63-66.
- [5] 何景彦,吴广宁,高波,等.用介质损耗分析高频电机匝间绝缘老化特性[J].高电压技术,2007,33(8): 165-168.
- [6] 朱勇穗,宋桂霞,张敬龙,等.PWM 脉冲电压下变频电机匝间绝缘研究[J].绝缘材料,2015,48(5): 40-43.
- [7] 任文娥,于钦学,钟力生,等.变频牵引电机线圈绝缘电老化规律的研究[J].西安交通大学学报,2012,46(12): 74-77.
- [8] 刘学忠,钟力生.兆瓦级风力发电机绝缘的重复脉冲电老化寿命评定方法[C]//2011 中国电工技术学会学术年会论文集,2011: 382-386.
- [9] 于钦学,任文娥,钟力生,等.冷热循环老化对变频调速电机电磁线绝缘电性能影响的研究[J].绝缘材料,2014,47(2): 67-70.
- [10] 张晓虹,卢伟胜,张亮,等.大电机主绝缘老化试验系统和试样设计[J].高电压技术,2001,27(4): 18-20.
- [11] 刘学忠,王放文,张天龙,等.5 MW 海上风力发电机绝缘系统的海洋环境模拟试验研究[J].高压电器,2015,51(5): 14-18.
- [12] DING X X, LIU X Z, ZHANG J J, et al. Study on multi-factor aging characteristics of stator insulation for wind turbine generator[C]//10th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials Bangalore India, 2012: 1-4.

收稿日期: 2017-01-20

[期刊订阅]

在邮局漏订的读者,可直接从邮局汇款至我杂志社发行部补订

地址:上海市武宁路 509 号电科大厦 17 楼《电机与控制应用》发行部
 邮编:200063 电话:021-62574990-745 传真:021-62576377
 国内邮发代号:4-199 每册定价:12.00 元 全年定价:144.00 元