

低压电机定子绝缘老化应力分析及寿命预测的研究*

骆东松 胡晓盼

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院 兰州 730050)

摘 要 为了研究低压电机在运行状态时的定子绝缘寿命,文中通过分析多种应力对定子绝缘的影响,确立了热应力与机械应力为两种主要老化应力,选取 F 级绝缘线棒进行多应力加速寿命试验并测量寿命数据,采用两参数威布尔分布处理试验数据得到交流电机的热老化寿命,应用最小二乘法基于试验数据得出威布尔分布两参数并结合逆幂率公式得出预测寿命曲线。结果表明该方法可以作为低压电机定子绝缘寿命预测评估的计算方法,对低压电机的维修与检测具有一定的意义。

关键词 低压电机;寿命预测;绝缘老化;威布尔分布;最小二乘法

中图分类号 TM301 **DOI:**10.3969/j.issn.1672-9730.2021.08.040

Research on Stress Analysis and Life Prediction of Stator Insulation of Low-voltage Motor

LUO Dongsong HU Xiaopan

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050)

Abstract In order to study the stator insulation life of low-voltage motors in operation, the article analyzes the influence of various stresses on the stator insulation, thermal stress and mechanical stress are established as two main aging stresses, and class F insulated wire rods are selected for multi-stress acceleration life test and measurement of life data, the two-parameter Weibull distribution is used to process the test data to obtain the thermal aging life of the low-voltage motor, the least square method is applied to obtain the two parameters of the Weibull distribution based on the test data and combine the inverse power formula to obtain the predicted life curve. The result shows that the method can be used as a calculation method for the evaluation of the stator insulation life of low-voltage motors, and has certain significance for the maintenance and inspection of low-voltage motors.

Key Words low-voltage motors, life prediction, insulation aging, Weibull distribution, least squares

Class Number TM301

1 引言

定子是电机的重要组成部分,也是影响电机寿命及可靠性的关键部件。定子绝缘在长期运行过程中,受到热、电、机械和其他因素的影响而发生绝缘老化和损伤,使其丧失绝缘能力,最终导致绝缘击穿。约有超过 1/3 的电机事故是由定子绝缘系统引起的,而且绝缘事故本身具有设备损坏大、修复难度高的特点,为此评定电机定子绝缘状态和预测定子绝缘剩余寿命具有重要的意义。

20 世纪七八十年代以来,国内外一些研究机

构和专家学者提出了关于设备使用寿命评估技术。文献[1]介绍了一种通过分析绕组绝缘电阻变化情况预测电机剩余寿命的方法;文献[2]采用经验概测法提出电机热老化损失率;文献[3~5]提出了大型高压电机可以通过计算剩余击穿电压从而预测电机绝缘寿命的方法,但都未提出针对低压电机定子绕组绝缘的寿命预测方法。

2 定子绝缘老化应力

低压电机在运行中,定子绕组会受到各种应力的影响,包括热、电气、环境和机械应力,称之为

* 收稿日期:2021年2月15日,修回日期:2021年3月29日

作者简介:骆东松,男,教授,研究方向:计算机控制技术、工业数据库、嵌入式系统开发等。胡晓盼,男,硕士研究生,研究方向:嵌入式系统开发。

TEAM 应力^[6]。国内外已经对电机定子绝缘的状态监测、故障诊断和寿命预测进行了许多研究^[7-15]。定子绕组试验主要包括直流耐压试验、交流耐压试验、电容量测试、介损测试和局部放电试验等。常见的绝缘老化诊断参数有绝缘电阻和极化指数、电流增加率、电容增加率、介损增加率、最大局部放电量等。

2.1 热应力对定子绝缘的老化影响

热应力老化是指当电机在高温状态下运行时,超过一定的极限温度后,线圈主绝缘会出现龟裂、分层化和挥发等现象,从而产生化学反应,导致绝缘材料物理与化学性质的变化。在TEAM 应力中,公认会造成定子绝缘逐渐老化并最终导致绝缘故障的应力为热应力,因此必须讨论并评估低压电机定子绝缘系统在热应力作用下的性能。经理论和实际证明,交流电机定子绝缘寿命与温度的关系符合阿伦尼乌斯公式(Arrhenius equation),可以从该公式推导出简单指数公式^[16-17]:

$$D = A_0 e^{-\frac{\ln 2 T}{m}} \quad (1)$$

式中: D 为绝缘寿命, h; A_0 指温度为 0°C 时的绝缘寿命; m 为常数, 根据不同绝缘等级选值, F 级绝缘 $m \approx 12$; T 为温度, K。

不同绝缘等级的材料, 其绝缘寿命通常由试验来确定, 图1为近年来热应力试验的结果。可以看出, 当工作温度每超过其绝缘极限温度 $m^\circ\text{C}$, 其绝缘寿命就会缩短一半。

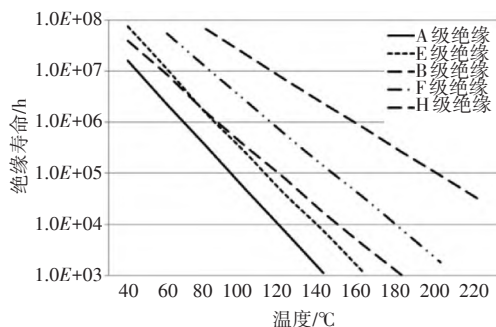


图1 不同绝缘等级下绝缘寿命与温度的关系

2.2 电气应力对定子绝缘的老化影响

电气应力老化是指在工频交流电场强度的长期作用下, 定子绝缘出现的老化。电气应力老化的表征现象是绝缘内部的气泡或绝缘表面出现电火花, 即漏电、局部放电及电腐蚀现象。

由于剩余击穿电压与许多老化诊断参数有关, 国内外不少学者如日本学者金神雅树基于大量统计结果, 成功地完成了电机的预防性维修, 得到定子绝缘耐压水平的经验公式^[4-5]:

$$\frac{U_{BD}}{U_n} = 12.0 - 2.2 \times \lg Q_m - 280 \left(\frac{\tan \delta_0}{R_1 \times C_0} \right)^2 \quad (2)$$

式中: U_{BD} 为推定剩余击穿电压值, kV; U_n 为额定电压值, kV; Q_m 为最大局部放电量, pC; $\tan \delta_0$ 为 2 kV 下的介质损耗角正切, %; R_1 为 1 min 绝缘电阻值, Ω ; C_0 为 2 kV 下的电容, F。

2.3 环境应力对定子绝缘的老化影响

环境应力包括多种环境因素, 如凝结在绕组上的潮气、过高的湿度、空气中的腐蚀性颗粒、工业生产过程中产生的粉尘、辐射物等。多种环境因素的结合会导致定子绝缘磨损, 产生表面电流和爬电等现象, 加剧定子绕组局部放电活动, 降低绝缘机械强度。

常用绝缘吸收比与极化指数检测交流电机定子绝缘材料的环境应力老化程度。在同一次绝缘电阻试验中, 绝缘吸收比 DAR 为 1 min 与 15 s 时的绝缘电阻值之比, 极化指数 PI 为 10 min 与 1 min 时的绝缘电阻值之比。当绝缘吸收比小于 1.3 且极化指数小于 1.5 时, 认为定子绕组整体受潮或者外部绝缘部分脏污。

2.4 机械应力对定子绝缘的老化影响

低压电机定子绝缘所受到的机械应力由工频电流产生, 当工频电流经过同一槽内上层和下层线圈或线棒时产生的两个磁场相互作用, 使得定子铜导体或线圈或线棒上下振动。对于 1 m 长的线圈上受到的径向作用力 F 可表示为

$$F = \frac{kI^2}{d} \quad (3)$$

式中: I 为流过线棒或线圈的电流有效值, 或 $I = nI_0$, 即 I 是匝线电流 I_0 与线圈匝数 n 的乘积; d 为定子铁线槽的宽度, m; k 为系数, $k = 0.96$ 。

设定子线棒的交流电流 $I = A \sin \omega t$, 代入式(3)后可表示为

$$F = \frac{kA^2(1 - \cos 2\omega t)}{2d} \quad (4)$$

式中: ω 为 $2\pi f$, f 为 50 Hz 工频频率; t 为时间。

式(4)表述了机械应力和流经定子线圈或线棒电流之间的关系。通过对式(4)的分析可以得出, 机械应力使得磁场力产生的两倍工频径向振动增加, 可能会使绕组端部的线圈或线棒弯曲。同时, 在电机合闸瞬间产生的暂态工频电流可能是电机额定电流的 5 倍或更高, 由此产生的电磁感应机械作用力为正常运行时的 25 倍或更大, 所以当电机频繁启动时, 如果它们无法承受这种力, 绕组线圈或线棒的绝缘就会开裂。长时间的机械应力会造

成定子绝缘的振动老化,文献[3]则提出了振动老化率 D_v 公式:

$$D_v(\%) = K_v G (\lg m)^a \quad (5)$$

式中: K_v 为振动老化系数, $K_v \approx 1.1 \times 10^{-10}$; G 为铁心振动加速度; m 为振动次数; a 为振动老化促进系数, $a \approx 12$ 。

结合式(4)与式(5),可以得到振动老化率 D_v 与振动次数 m 之间的关系, M 为定子线圈质量:

$$D_v(\%) = \frac{kA^2 K_v (\lg m)^a \times (1 - \cos 2\omega t)}{2dM} \quad (6)$$

从式(6)中可以看出,当振动次数越多时,振动老化率越大,也就表明定子绕组绝缘的机械应力老化程度越高。

本文着重于研究低压电机定子绝缘状态,大多数绝缘防护等级为F的中小型交流电机采用散嵌线绕组方式将等级为180的聚酯亚胺漆包线缠绕在定子铁心上。根据文献[18]对聚酯亚胺漆包线的研究,该漆包线在高温状态下的击穿电压高达9.9KV。根据国标GB14711-2013与GB/T22719.2-2008中的要求,低压电机的冲击电压试验电压值为5KV加上该电机额定电压的4倍,远小于能够击穿定子绝缘的电压,因此工频电气对低压电机定子绝缘老化的影响非常小。

综上,在能够引起定子绝缘老化的四种应力中,主要老化应力为热应力与机械应力,电应力与环境应力为次要老化应力。

3 定子绝缘的加速寿命试验

低压电机的绝缘寿命一般在20年~25年,如果采用实际条件进行绝缘老化寿命试验,则需要花费大量时间才能得出试验数据。因此可以采用加速寿命试验,这种加速进程会使定子绝缘在极短的时间内发生绝缘故障,得出理论意义下的绝缘老化寿命。

3.1 绝缘老化的判断标准

在实际工业现场中,需要通过计算绝缘吸收比和极化指数的值从而判断定子线圈是否受潮,同时低压电机的定子绝缘电阻不得低于0.5 MΩ。

3.2 多应力老化试验

本文的加速寿命试验主要研究热应力与机械应力两种老化应力对定子绝缘的影响^[19]。具体试验方法:将试验线棒置入烘箱,在试验线棒的中间和一端同时施加正选交变应力,使线棒受到相应频率的激振力,用以模拟电机运行中的定子振动状

态,再使烘箱升温至试验温度,并在试验中实时检测线棒的绝缘电阻直至试验线棒被破坏后记录寿命时间。

电机在正常运行过程中,两倍工频径向振动大幅增加,为保证加速老化进程并使试验数据具有代表性,振动频率选取100Hz,双振幅值为0.8mm,温度选取120℃、155℃和190℃三个温度作为多应力老化试验条件。不同试验条件下线棒的平均寿命时间见表1。

表1 不同试验条件下线棒的平均寿命时间

温度/℃	试样 1/h	试样 2/h	试样 3/h
120	56.69	56.37	57.21
155	20.13	19.22	18.92
190	4.27	4.58	4.44

由于试验采用的线棒均为同一批次产品,试验环境基本一致,所以得到的寿命数据具有普适性,因此可以用来验证或考核低压电机定子绝缘的广义热老化寿命。

4 寿命试验数据的统计与分析

威布尔分布^[20](Weibull distribution)采用“链式”模型来解释寿命问题,则其寿命取决于最薄弱环节的寿命。单个链的寿命为一随机变量,设各环寿命相互独立,分布相同,链寿命的概率分布就变成求极小值分布问题。由于可以通过概率值推出其分布参数来处理各种寿命试验数据,被广泛应用于工程的可靠性检验中,尤其适用于机电类产品的磨损累计失效的分布形式。

4.1 两参数威布尔分布

国外学者Lundberg和Palmgren首次提出两参数威布尔分布理论,主要用于滚动轴承的寿命试验以及高应力水平下的材料疲劳试验。低压电机在运行过程中除电应力外,定子绝缘与滚动轴承所受其他应力大致相同,且电应力为次要影响老化应力,所以可以认为定子绝缘寿命也服从两参数威布尔分布,其概率密度函数与累计密度函数分别为

$$f(t) = \frac{m}{\sigma_0} \left(\frac{t}{\sigma_0} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\sigma_0}\right)^m} \quad (7)$$

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\sigma_0}\right)^m} \quad (8)$$

式中: m 为形状参数, σ_0 为尺度参数。

4.2 最小二乘回归分析法

可从威布尔分布累计密度函数证明形状参数 m 与尺度参数 σ_0 之间存在线性关系,证明结果如下:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(x)} \right) \right] = m \ln x - m \ln \sigma_0 \quad (9)$$

出于对精度与复杂度的追求,本文引用最为经典的最小二乘回归分析法。最小二乘法广泛应用于误差估计、系统预测、曲线拟合等领域中。最小二乘参数估计方法如下:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{i}{n+1}} \right) \right\} \quad (10)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (11)$$

$$\hat{m} = \frac{\left\{ n^2 \bar{Y} \cdot \left(\ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{i}{n+1}} \right] \right\} \right) \right\} - n^2 \bar{x} \bar{Y}}{\left\{ n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln x_i)^2 \right\} - (n \bar{Y})^2} \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_0 = e^{(\bar{Y} - \bar{x}/\hat{m})} \quad (13)$$

根据表1中的样本数据,可以得到简单线性回归模型参数的估计量,即不同试验条件下威布尔分布中的两参数,见表2。

表2 不同试验条件下威布尔分布两参数

温度/°C	形状参数 m	尺度参数 σ_0
120	93.222	56.7453
155	4.86319	21.7824
190	6.73599	4.81856

5 定子绝缘寿命预测

根据文献[21]可知,在单应力老化作用下,定子绝缘的寿命符合逆幂律经验式。本文研究定子绝缘的多应力老化寿命,则结合振动老化率 D_v 与逆幂律经验式,得出低压电机定子绝缘寿命的寿命预测经验式:

$$L = D_v K T^{-n} \quad (14)$$

式中: L 为相应试验条件下的寿命值, h; K 为逆幂律常数; T 为电机运行时温度, °C; n 为耐力系数。

从该寿命预测经验式中可以看出,多应力老化条件下定子绝缘寿命与电机运行时的温度和振动次数相关。通过表2中两参数可计算出不同条件下的定子绝缘寿命,再次利用最小二乘法拟合后得到两参数:

$$K = 8.358 \times 10^6$$

$$n = -6.152$$

将两参数和电机正常运行时的温度与振动参数代入式(14)中,预测的寿命为81214h。通过威布尔分布函数中的形状参数与尺度参数可以拟合

出该电机定子绝缘在多应力条件下的寿命曲线,如图2所示。

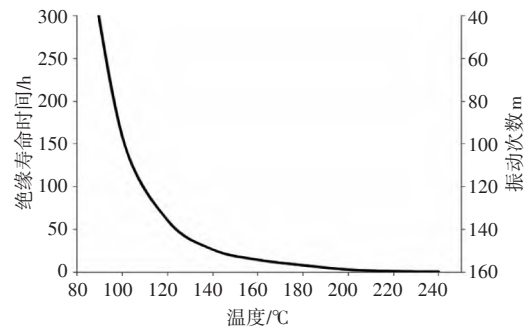


图2 多应力条件下低压电机定子绝缘寿命曲线图

6 结语

本文通过对低压电机定子绝缘老化应力的分析,加速老化试验及数据分析得出以下结论。

1)通过对老化应力的分析,确立低压电机定子绝缘在运行中所受老化应力以热应力与机械应力为主。

2)在加速老化试验中,发现较高的试验温度会使得定子绝缘表面出现龟裂,热老化寿命以指数形式下降。

3)通过最小二乘回归分析法得出的寿命曲线可以作为低压电机定子绝缘寿命预测评估的计算方法,可用于低压电机的维修与检测中。

参考文献

- [1] 杨斌文. 电机绝缘质量的判断及剩余寿命的预测[J]. 电机技术, 1996(03): 27-29.
- [2] 沈蔚. 电机绝缘系统热寿命预测[J]. 金山油化纤, 1986(02): 60-62, 50.
- [3] 鲍惠玲, 王振永. 旋转电机绝缘寿命预测[J]. 哈尔滨电工学院学报, 1992(01): 24-29.
- [4] 张蕊, 严璋. 预测大电机绝缘寿命方法综述[J]. 大电机技术, 2004(04): 41-43, 71.
- [5] 任文娥, 刘红文, 于钦学, 等. 发电机定子线圈绝缘诊断与寿命预测[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 7-12.
- [6] Greg C. Stone. 旋转电机的绝缘: 设计评估老化试验修理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 31.
- [7] NAKAYAMA A. Statistical Estimation Method of Remaining BDV and Life Expectancy for Generator Stator Winding by Using Nondestructive Insulation Siagnostic Data [C]// Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Nagoya :IEEE, 1999: 528-531.
- [8] NAKAYAMA A, HAGA K. Estimating Remaining BDV and Life Expectancy for Stator Winding Insulation of Rotat- (下转第179页)

- 的应用[J]. 低碳世界, 2016(5):216-217.
- [5] 董志勇, 胡金榜. 超声波衰减系数法评估材料损伤的研究[J]. 化工机械, 2007(03):139-143.
- [6] 杨凤民. 铸铁件的超声波检测[J]. 现代铸铁, 2001(04):61-64.
- [7] 刘云霞, 刘晓强, 赵鑫, 等. 洛氏硬度现场检测与实验室检测对比[J]. 物理测试, 2018(1):42-45.
- [8] 徐彦霖, 王增勇, 黄振翹. 奥氏体不锈钢平均晶粒尺寸的超声评价技术[J]. 无损检测, 2001(06):246-248.
- [9] 何晓晨, 金世杰, 林莉. 超声背散射信号递归定量分析无损表征 CFRP 孔隙分布仿真[J]. 复合材料学报, 2018(10):159-165.
- [10] 牟云飞, 张翔, 林莉, 等. 基于随机孔隙模型的 CFRP 孔隙率超声检测研究[J]. 机械工程学报, 2010(4):22-26.
- [11] 朱丹, 曾效舒. 铸铁件超声波检测方法的应用和发展[J]. 现代铸铁, 2009(5):76-79.
- [12] 吴伟, 张颜艳, 张士晶, 等. 超声声速无损评定 304 不锈钢晶粒尺寸[J]. 金属热处理, 2010(7):94-97.

(上接第 176 页)

- ing Machines by Using Nondestructive Insulation Diagnostic Data [C]//International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya: IEEE, 2003: 286-289.
- [9] KARLSSON A, KARLSSON T. Estimating Lifetimes for Stator Windings in Hydropower Generators [C]//International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH. Stockholm, Sweden: IEEE, 2006:1-8.
- [10] GEBRAEEL N, ELWANY A, PAN J. Residual Life Predictions in the Absence of Prior Degradation Knowledge [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58 (1): 106-117.
- [11] HAMMER M, KOZLOVSKY T, SZABO R, et al. The Use of neural Networks for the Life Prediction of Insulating Material of Electric Rotating Machines [C]// International Conference on Solid Dielectrics. Toulouse, France: IEEE, 2004:546-549.
- [12] ARSHAD M, KHALIQ A. Turbo Generator Stator Winding Condition Assessment [C]// International Conference on Power System Technology. Singapore: IEEE, 2004: 1399-1403.
- [13] GJARDEA C. Multi-factor Aging Models—origin and Similarities [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and EI, 1997, 13(1):6-13.
- [14] TANAKA T. Partial Discharge Pulse Distribution Pattern Analysis [J]. IEE Proceedings Science Measurement and Technology, 1995, 142(1): 46-50.
- [15] 纪天华. 水电站定子绕组绝缘的老化特性和寿命预测[J]. 水电站机电技术, 2006, 29(4): 9-11.
- [16] 鲍晓华, 刘冰, 朱庆龙, 等. 基于 BP 神经网络高压潜水电机绝缘寿命预测[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(11):57-62.
- [17] 丁亮, 徐蕊, 罗华利, 等. 基于热损伤累加准则的风力发电机绝缘寿命预测[J]. 可再生能源, 2013, 31(10): 57-61.
- [18] 李强军, 姜其斌, 王楷, 等. 聚酯亚胺漆包线漆适度交联结构与性能研究[J]. 绝缘材料, 2007(03):29-31.
- [19] 史进渊. 大型汽轮发电机定子线圈 F 级绝缘寿命预测方法的研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(07): 507-516.
- [20] 杨贤, 冯达, 李冲, 等. 基于威布尔分布的油纸套管寿命预测模型[J]. 高压电器, 2015, 51(11):103-109.
- [21] 袁端磊, 王海燕, 杨芳, 等. 固体绝缘件长时间正常工作条件下电老化寿命评估方法研究[J]. 高压电器, 2017, 53(04):31-35, 40.