

定子线棒主绝缘介电常数计算原理和试验方法

陈丽颖, 兰文宝

(哈尔滨学院 电子工程系, 哈尔滨 150076)

摘要: 定子线棒主绝缘在运行中承受多重应力联合作用, 其介电性能对保证发电机安全运行具有重要影响。根据复合材料介电常数计算理论, 建立了发电机定子线棒主绝缘的简化模型, 给出了主绝缘介电常数的计算方法, 结合各种材料的参数和含量得到了主绝缘介电常数的理论分析值。通过分析得到了适用于圆角电极结构的发电机定子线棒主绝缘介电常数试验计算方法, 根据定子线棒尺寸参数和试验得到的电容量, 可推算主绝缘的实际介电常数。在此基础上, 通过模拟线棒介电常数试验和理论分析结果对比, 验证了所提方法的准确性。

关键词: 定子线棒; 主绝缘; 介电常数; 复合材料

DOI: 10.15938/j.jhust.2023.04.015

中图分类号: TM303.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2023)04-0127-06

Calculation Principle and Test Method of Main Insulation Dielectric Constant of Stator Bar

CHEN Liying, LAN Wenbao

(Department of Electronic Information Engineering, Harbin University, Harbin 150076, China)

Abstract: The main insulation of the stator bar is subjected to the combined action of multiple stresses during operation, and its dielectric properties have an important impact on ensuring the safe operation of the generator. Based on the calculation theory of composite dielectric constant, a simplified model of main insulation of generator stator bar is established, and the calculation method of main insulation dielectric constant is given. The test calculation method of the main insulation dielectric constant of the generator stator bar is obtained which is suitable for the fillet electrode structure. According to the size parameters of the stator bar and the capacitance obtained by the test, the actual dielectric constant of the main insulation can be calculated. On this basis, the accuracy of the proposed method is verified by comparing the results of model test bar dielectric constant test and theoretical analysis.

Keywords: stator bar; main insulation; dielectric constant; composite material

0 引言

大型发电机在运行中定子线棒承受着热、电、环境和机械 (TEMA) 应力的综合作用, 定子线棒的介电性能对保证发电机安全运行具有影响。定子线棒的性能参数较多, 结构参数中重要的主绝缘厚度、防晕长度等, 以及性能参数如损耗密度、介电常数、起晕电压、介电强度等^[1-4]。其中, 发电机主绝缘性能

参数, 对性能的影响非常重要, 介电常数是其中最关键的绝缘性能参数之一^[5-7]。

主绝缘介电常数对定子线棒的诸多性能均产生影响, 包括表面电位分布、介质损耗大小和起晕电压等^[8-10], 国内专家对大型发电机主绝缘的频域介电特性的研究比较深入, 并且给出了温度、潮湿及热老化对定子线棒主绝缘介电性能的影响^[11-16], 但是并未给出定子线棒的介电常数计算方法。因此, 明确定子线棒的介电常数的计算原理和试验方法, 对提

收稿日期: 2022-06-23

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (LH2022F040); 黑龙江省高等教育教学改革研究项目 (SJGY20220499); 国家自然科学基金 (52177037)。

作者简介: 兰文宝 (1975—), 男, 硕士, 副教授。

通信作者: 陈丽颖 (1977—), 女, 硕士, 实验师, E-mail: cly1166@126.com。

高定子线棒的综合性能起到关键作用,对发电机主绝缘状态的评估及性能的影响起决定性作用^[17-19]。然而,由于定子线棒主绝缘材料的更新换代较为缓慢,从上世纪 50 年代起,经历了 B 级虫胶云母绝缘(白绝缘)、B 级沥青云母绝缘(黑绝缘)和 F 级环氧云母绝缘(黄绝缘)等多个阶段,基本十几年甚至几十年才能更新一次。因此,传统认为主绝缘介电常数的变化范围不大,该方面的研究深度也不够。随着高性能环氧树脂的发展和云母矿的变化、以及定子线棒不同制造体系的发展,包括多胶模压(RR)、多胶液压、少胶真空压力浸渍(VPI)等工艺的出现,使得定子线棒主绝缘在不同原材料和制造工艺下的介电常数均有一定的变化。同时,定子线棒的额定电压越来越高,现已达到 24 kV 以上,这也对定子线棒介电常数的深入研究提出了更高的要求^[20]。

本文以发电机定子线棒主绝缘介电常数为研究对象,建立了主绝缘介电常数的理论模型和推导方法,得出了主绝缘介电常数的试验和求解方法、给出了试验注意事项,对主绝缘介电常数的确定、定子线棒绝缘和防晕结构的设计具有一定的参考作用。

1 模型

1.1 串联复合介质的电场分布原理

复合介质就是宏观不均匀介质。通常低频高压绝缘材料大部分是由几种宏观电性能不同的多层介质复合而成,如云母纸板、酚醛层压板等^[21]。每种绝缘材料具有不同的介电性能和结构尺寸。当接入电压时,每层介质中的电场与介电常数成反比分布。当电压作用时间相当长时,在多层介质界面上积聚了一定的自由电荷,改变了初始的电场分布,直到多层的电导电流密度相等。因此,多层介质在电压长期作用后,电场和电导率成反比分布。

作为特例,双层介质电容器中的电压和电场分布如图 1 所示。

图 1 主要分为 3 种状态。第 1 种状态是当接于直流电压 U_0 时,对应的电位分布如曲线 1 所示,对应的电场分布如 E_1' 、 E_2' 所示;第 2 种状态是电压 U_0 长期作用下,对应的电位分布如曲线 2 所示,对应的电场分布如 E_1'' 、 E_2'' 所示;第 3 种状态是电极短路后,对应的电位分布如曲线 3 所示,对应的电场分布如 E_1''' 、 E_2''' 所示。可以看出,在不同状态下,多层复合介质内部的电压分布和电场分布存在很大差别。

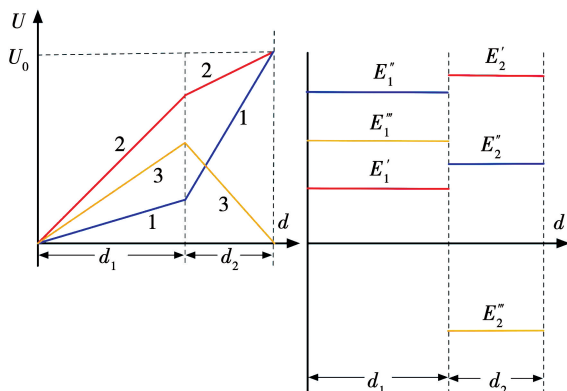


图 1 双层介质电容器中的电压和电场分布

Fig. 1 Voltage and electric field distribution in double-layer dielectric capacitor

对于大型发电机定子线棒,通常在工频交流电压下运行。因此,在多层复合材料情况下,电压分布和电场分布与第 1 种“当接于直流电压 U_0 时”一致,仅与介电常数分布相关,而基本与电导率分布无关。

1.2 主绝缘介电常数模型

定子线棒主绝缘由云母带半叠绕多层包扎,经浸渍、加热加压固化而成。在固化过程中,云母带中的树脂流入每层云母带之间,起到有效粘连的作用。云母带的主要成份包括云母片(或云母粉)和玻璃丝带,而胶黏剂通常为环氧树脂。在制备过程中,线棒主绝缘内外层的压力是均匀的,因此,对于主绝缘复合介质材料,每种材料每层的厚度是一致的,可表示为多种不同材料层状结构,如图 2 所示。

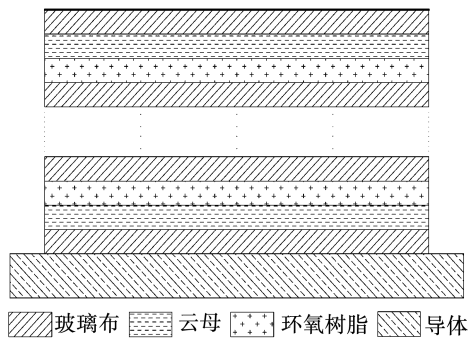


图 2 定子线棒主绝缘多层结构

Fig. 2 Stator bar main insulation multilayer structure

由图 2 可见,每层定子线棒主绝缘均简化为三层材料(玻璃布、云母、环氧树脂)结构,且每层材料的厚度均不相同。在径向纵向施加外电压,可以得到定子线棒主绝缘总的电容量为

$$C_z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{C_{1i}} + \frac{1}{C_{2i}} + \frac{1}{C_{3i}} \right)} \quad (1)$$

式中: C_z 为主绝缘总的电容量, F; n 为主绝缘包扎层数; C_{1i} 为第 i 层玻璃布电容量, F; C_{2i} 为第 i 层云母电容量, F; C_{3i} 为第 i 层环氧树脂电容量, F。

电容量与介电常数存在确定的关系:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (2)$$

式中: C 为电容量, F; ε_0 为真空介电常数, F/m; ε_r 为材料相对介电常数; A 为上下电极表面积, m^2 ; d 为试样厚度, m。

根据式(2)电容量和介电常数的关系, 将式中的电容量替换, 可以得到:

$$\varepsilon_z = \frac{d_z}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{1i}}{\varepsilon_1} + \frac{d_{2i}}{\varepsilon_2} + \frac{d_{3i}}{\varepsilon_3} \right)} \quad (3)$$

式中: ε_z 为主绝缘总的相对介电常数; d_z 为主绝缘总厚度, m; ε_1 为玻璃布的相对介电常数; d_{1i} 为第 i 层玻璃布的厚度, m; ε_2 为云母的相对介电常数; d_{2i} 为第 i 层云母的厚度, m; ε_3 为环氧树脂的相对介电常数; d_{3i} 为第 i 层环氧树脂的厚度, m。

每层材料的厚度和等于总厚度, 即:

$$d_1 = \sum_{i=1}^n d_{1i} \quad (4)$$

式中: d_1 为玻璃布的总厚度, m;

其它材料厚度合并方式与此一致。根据式(4), 将式(3)中每种材料的厚度项进一步合并, 化简得到:

$$\varepsilon_z = \frac{d_z}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + \frac{d_3}{\varepsilon_3}} \quad (5)$$

根据式(5), 将图2进一步简化, 得到定子线棒主绝缘介电常数的多种材料的简化结构, 如图3所示。

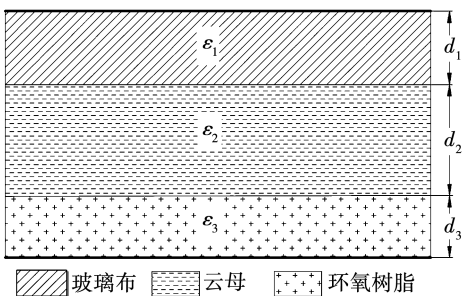


图3 定子线棒主绝缘简化结构

Fig. 3 Simplified structure of stator bar main insulation

由于电极上下表面积相同, 因此总厚度与总体积成正比, 故每种材料的厚度占比可转化为

$$\frac{d_i}{d_z} = \frac{\eta_i / \rho_i}{\sum_{i=1}^n \eta_i / \rho_i} \quad (6)$$

式中: d_i/d_z 为第 i 种材料的厚度占比; η_i 为第 i 种材料质量百分比, %; ρ_i 为第 i 种材料密度, kg/m^3 。因此, 在确定玻璃布、云母和环氧树脂每种材料相对介电常数和质量比, 带入式中即可计算得到定子线棒主绝缘的总介电常数。同时, 也可通过调整不同材料的介电常数和质量比来调节主绝缘总的介电常数。

1.3 定子线棒介电常数试验计算方法

发电机定子线棒的截面为圆角矩形结构, 内部为导体, 外部为主绝缘材料, 如图4所示。

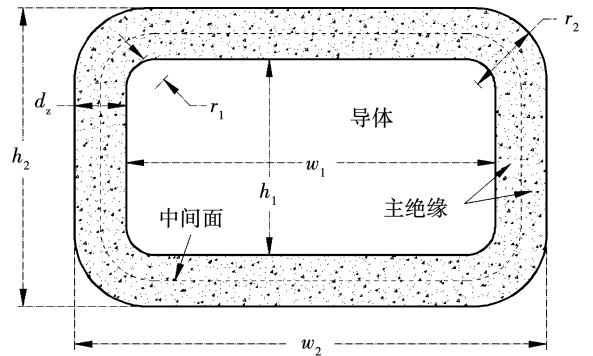


图4 定子线棒截面结构

Fig. 4 Stator bar section structure

图4中整个主绝缘区域为圆角矩形, 环状包围在导体引线上。根据式(2), 计算主绝缘介电常数, 通过试验取得电容量 C 的情况下, 需明确主绝缘总厚度 d_z 和中间面的面积 A 。主绝缘总厚度 d_z 可取宽度和高度测量的平均值, 即:

$$d_z = \frac{w_2 + h_2 - w_1 - h_1}{4} \quad (7)$$

式中: w_1 为内部导体矩形宽度, m; h_1 为内部导体矩形高度, m; w_2 为外部导体矩形宽度, m; h_2 为外部导体矩形高度, m。

由于内外面的截面周长不等, 在计算面积时, 需要取中间面周长, 中间面周长近似等于内面周长与外面周长的平均值, 同时考虑角部长度的影响, 可以得到:

$$A = [w_1 + h_1 + w_2 + h_2 - (4 - \pi)(r_1 + r_2)]l \quad (8)$$

式中: r_1 为内部导体圆角半径, m; r_2 为外部导体圆角半径, m; l 为定子线棒测量电容量时所包扎电极长度, m。由上式可以看出, 边长越大、圆角半径越小, 等效面积 A 越大。但在实际生产制造中, 定子

线棒的高宽比(高度和宽度的比例)需在一定的范围内,高宽比过大,设计和制造难度增大,不适于线棒生产制造。内外圆角半径也不易过小或过大。内圆角半径过小,角部电场集中,易引起定子线棒击穿;内圆角半径过大,无法进行铜导线设计。外部圆角半径过小,角部电场集中,易引起定子绕组电晕;外圆角半径过大,将引起主绝缘厚度过小,易引起线棒击穿。因此,无论是定子线棒外形尺寸还是内部结构,均需考虑以上因素,才能保证定子线棒和定子绕组性能。

根据式(7)和式(8),分别得到定子线棒主绝缘的总厚度 d_z 和中间面的等效面积 A ,将 d_z 和 A 代入式(2)线棒测试介电常数为

$$\varepsilon_r = \frac{Cd_z}{\varepsilon_0 A}$$

(9)

2 实验

2.1 定子线棒基本结构

发电机定子线棒的截面为圆角矩形结构,为清晰表达,采用的模拟线棒结构用截面 1/4 显示,如图 5 所示。

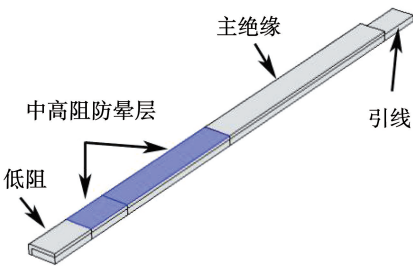


图 5 发电机模拟试验线棒四分之一结构
Fig. 5 Generator simulation test bar quarter structure

图 5 中发电机模拟试验线棒主要由引线、主绝缘、槽部低阻和端部中高阻防晕层所组成。引线主要作用是传输电流和能量,主绝缘的主要作用是隔离高电位、承受高电场,槽部低阻的主要作用是保证定子线棒槽部与铁心间有效的电气连接,端部中高阻防晕层的主要作用是保证线棒端部电位梯度平缓变化、避免高电场和高温。

2.2 主绝缘介电常数试验方法

在进行模拟试验线棒介电常数试验时,对线棒槽部低阻部分接地,并断开低阻与中高阻之间的连接,采用电屏蔽环作为保护电极的方法,保护电极与低阻间的测量间隙为 3 ~ 10 mm,测量线棒在指定长度下的电容量试验方法与介质损耗因数测量方法是一致的,如图 6 所示^[21-22]。

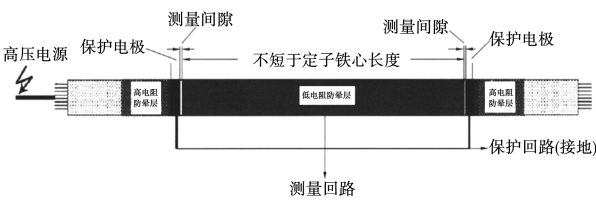


图 6 发电机模拟试验线棒电容量/介质损耗因数测量方法

Fig. 6 Generator simulation test bar capacitance/dielectric loss factor measurement method

2.3 试验过程及结果分析

2.3.1 主绝缘介电常数计算结果

在模拟试验线棒制作中,采用西安绝缘材料厂 5440-1H 多胶云母带材料进行热压,对成品线棒的成分进行分析,采用马弗炉灼烧得到玻璃丝含量、云母含量和胶含量,如表 1 所示。

表 1 主绝缘组成材料性能和结构参数
Tab. 1 Main insulation composition material performance and structural parameters

组成材料	相对介电常数	密度/(kg/m ³)	质量分数/%	推算厚度占比
玻璃布	3.4	1.9	20	25.72%
云母	7.0	3.3	42	31.10%
环氧树脂	3.5	2.15	38	43.18%

根据表 1 和式(6)可以得到,材料 1 玻璃布的介电常数 $\varepsilon_1 = 3.4$ 、厚度占比 $d_1/d_z = 25.72\%$,材料 2 云母的介电常数 $\varepsilon_2 = 7.0$ 、厚度占比 $d_2/d_z = 31.10\%$,材料 3 环氧树脂的介电常数 $\varepsilon_3 = 3.5$ 、厚度占比 $d_3/d_z = 43.18\%$ 。将上述参数代入主绝缘介电常数模型式(5)中,得到该定子线棒主绝缘相对介电常数的理论计算值 4.108。

2.3.2 线棒介电常数实验结果

为保证结果可重复性,取 5 支模拟试验线棒,进行线棒主绝缘介电常数实验。模拟试验线棒及接线如图 7 所示。

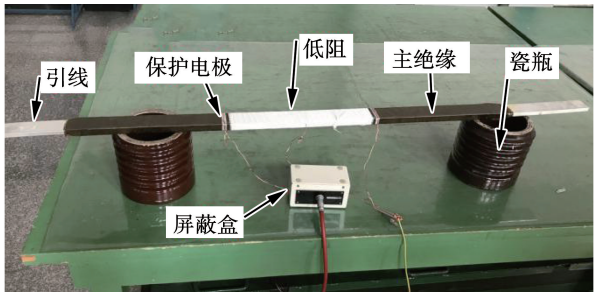


图 7 模拟试验线棒介电常数试验及接线方法
Fig. 7 Simulation test wire rod dielectric constant test and wiring method

在图 7 中,线棒低阻上包裹 0.1 mm 厚的铝箔,然后使用玻璃丝带紧紧扎紧,中间在铝箔上绑扎软铜线并接地。低阻两侧均有保护电极,与低阻一同接入屏蔽盒中保证试验准确。线棒引线接高压电源,线棒端部主绝缘部分放在瓷瓶上悬浮,避免在实验过程中放电。

5 支模拟线棒的内芯均采用宽 $w_1 = 51\text{ mm}$ 、长 $h_1 = 13\text{ mm}$ 的铝排,倒角半径为 $r_1 = 2\text{ mm}$,压制时,保证主绝缘总厚度 $d_2 = 3.5\text{ mm}$,每支线棒厚度略有差别,但变化不大,尺寸误差小于 1%。压制后线棒外圆角半径基本为 $r_2 = 5\text{ mm}$ 左右。每支线棒的低阻长度 L 均为 400 mm。采用瑞士 HAEFELY2877 电桥进行实验,测试电路如图 8 所示。

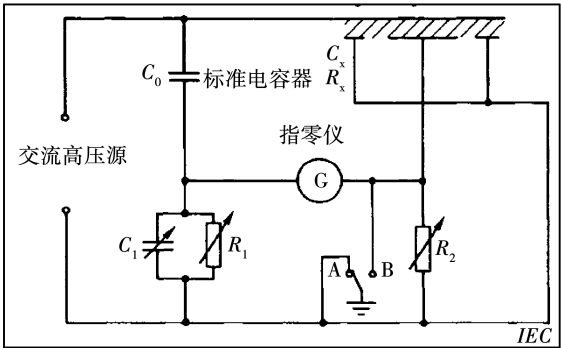


图 8 定子线棒电容/介质损耗因数测试电路
Fig. 8 Stator bar capacitance/dielectric dissipation factor test circuit

根据线棒测试结果,得到 5 支线棒的电容测量值。将定子线棒主绝缘几何尺寸和电容值带入(7)~(9)中,推算得到相应的相对介电常数,如表 2 所示。

表 2 模拟线棒电容试验及介电常数结果
Tab.2 The results of capacitance test and dielectric constant of analog wire rod

序号	电容测量值/pF	推算相对介电常数
1	489	3.958
2	506	4.103
3	498	4.035
4	520	4.213
5	503	4.078
平均值	503	4.0774

由表 2 可知,5 支线棒的电容量测量平均值为 503pF,得到的相对介电常数平均值为 4.077 4,这与理论计算得到的 4.108 基本一致,两者误差仅为 0.74%,验证了所提模型和方法的正确性。

3 结 论

建立了发电机定子主绝缘介电常数计算原理模型,结合材料参数提取和电容量实验,推算模拟线棒的介电常数结果,得到如下结论:

- 1)根据复合材料介电常数计算理论,建立了发电机定子线棒主绝缘介电常数的多层材料计算模型,通过理论推导得到了线棒多层材料的简化模型;
- 2)得到了适用于圆角电极结构的发电机定子线棒主绝缘介电常数的计算方法;
- 3)通过发电机定子线棒介电常数计算模型的计算结果与实验结果对比,误差仅为 0.74%,验证了该模型的正确性,具有很好的工程应用价值。

参 考 文 献:

[1] 陈阳,孙玉田,孙永鑫.大型电机定子线圈及绕组绝缘介质损耗因数试验标准分析综述[J].绝缘材料,2019,53(1):9.
CHEN Yang, SUN Yutian, SUN Yongxin. Analysis and Review in Testing Standard for Dielectric Loss Factor of Stator Coil and Winding Insulation for Large Rotating Machine[J]. Insulating Materials, 2019, 53 (1): 9.

[2] 胡波.高压电机定子线圈端部防晕结构对端部介质损耗和电容的影响[J].东方电机,2014(2):51.
HU Bo. Effect of Corona Protection Structure on End Dielectric Loss and Capacitance of High Voltage Motor Stator Coil[J]. Dongfang Electric Machinery,2014 (2): 51.

[3] 胡波,周进,张跃,等.交流电动机单支线圈与整机绕组介质损耗复合计算初探[J].大电机技术,2019(4):27.
HU Bo, ZHOU Jin, ZHANG Yue, et al. Study on Multiplex Calculation of Dielectric Loss between Single Coil and Stator Winding for AC Motor[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2019(4): 27.

[4] 胡建林,赵禹来,刘剑,等.大型水轮发电机定子线棒绝缘参数对线棒槽部表面电位分布及电场分布的影响[J].绝缘材料,2020,53(4):39.
HU Jianlin, ZHAO Yulai, LIU Jian, et al. Influence of Insulation Parameters on Surface Potential and Electric Field Distribution on Slot Part of Large Hydro-generator Stator Bar[J]. Insulating Materials, 2020,53(4): 39.

[5] 咸哲龙,姜建国,曹海翔.电机定子结构及其绝缘介电常数的频率特性对定子绕组电容值的影响[J].中国电机工程学报,2004(8):132.
XIAN Zhelong, JIANG Jianguo, CAO Haixiang. The Effect of Structure and Frequency Characteristic of Dielectric Constant on Capacitance of Electrical Machine Stator Winding [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 43

- (2): 54.
- [6] 张跃,梁智明,黄绍波,等. 大型水轮发电机定子线棒均压结构仿真及试验研究[J]. 绝缘材料,2018,51(7):54.
ZHANG Yue, LIANG Zhiming, HUANG Shaobo, et al. Simulation and Experimental Research of Large Hydro-generator Stator Bar with Grading Structure[J]. Insulating Materials, 2018,51(7): 54.
- [7] 胡波,梁智明,漆临生,等. 大型水轮发电机定子线棒的局部内均压层的特征参数研究[J]. 绝缘材料,2010,43(2):54.
HU Bo, LIANG Zhiming, QI Linsheng, et al. Study on Characteristic Parameters of Partial Inner Potential Grading in Stator Bar of Hydraulic Turbine Generator[J]. Insulating Materials, 2010,43(2): 54.
- [8] EMERY F T. Partial Discharge, Dissipation Factor, and Corona Aspects for High Voltage Electric Generator Stator Bars and Windings[J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2005, 12(2): 347.
- [9] PHILLIPS D B, OLSEN R G. Corona Onset as a Design Optimization Criterion for High Voltage Hardware[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2000, 7(6): 744.
- [10] 刘骥,韩英喆,赵立胜,等. 定子主绝缘受潮频域介电参量提取及状态评估[J]. 电机与控制学报,2022,26(1):32.
LIU Ji, HAN Yingzhe, ZHAO Lisheng, et al. Extraction of Dielectric Parameters and Status Evaluation of Stator Main Insulation in Frequency Domain[J]. Electric Machines and Control, 2022,26(1): 32.
- [11] 高波,郝长金,尹小兵,等. 发电机主绝缘加速老化的频域介电特性[J]. 电机与控制学报,2019,23(3):57.
GAO Bo, HAO Changjin, YIN Xiaobing, et al. Frequency Domain Dielectric Properties of Accelerated Aging Generator Stator Insulation[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(3): 57.
- [12] 孙福春,王安东,王继豪,等. 电机定子线棒绝缘频域介电谱评估[J]. 哈尔滨理工大学学报,2021,26(3):13.
SUN Fuchun, WANG Andong, WANG Jihao, et al. Evaluation of Frequency Domain Dielectric Spectroscopy of Generator Statorbar Insulation[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021,26(3): 13.
- [13] 高波,郝长金,尹小兵,等. 温度对发电机主绝缘频域介电响应的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(3):915.
GAO Bo, HAO Changjin, YIN Xiaobing, et al. Research on the Influences of Temperature on Frequency Domain Dielectric Spectroscopy of the Main Insulation of Generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(3): 915.
- [14] 张征平,王兵,涂小涛,等. 温度对汽轮发电机主绝缘频域介电谱特性的影响分析[J]. 绝缘材料,2016,49(4):55.
ZHANG Zhengping, WANG Bing, TU Xiaotao, et al. Effect of Temperature on Frequency Domain Dielectric Spectroscopy Characteristics of Large Turbine-Generator Stator Insulation[J]. Insulating Materials, 2016, 49(4): 55.
- [15] 杨敏,王新,童小忠,等. 热老化对发电机定子线棒用环氧—云母绝缘频域介电特性的影响[J]. 高压电器,2021,57(1):94.
YANG Min, WANG Xin, TONG Xiaozhong, et al. Effect of Thermal Aging on Frequency Domain Dielectric Properties of Epoxy-mica Insulation for Generator Stator Bars[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(1): 94.
- [16] 张征平,郝长金,涂小涛,等. 大型发电机主绝缘的 Cole-Cole 模型频域介电温度特性研究[J]. 电工电能新技术,2016,35(6):29.
ZHANG Zhengping, HAO Changjin, TU Xiaotao, et al. Study on The Frequency Domain Dielectric Temperature Characteristics of The Cole-Cole Model for The Main Insulation of Large Generators[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016,35(6): 29.
- [17] 宋扬. 电老化对发电机定子线棒主绝缘介电特性影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2020.
- [18] 王兵. 汽轮发电机主绝缘多因子老化的介电响应特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [19] 郝长金. 基于介电响应法的发电机主绝缘状态评估技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [20] 刘凤娟,刘睿,田冀焕. 定子线棒内均压结构对槽部电场强度及介质损耗因数的影响[J]. 绝缘材料,2012,45(4):73.
LIU Fengjuan, LIU Rui, TIAN Jihuan. Effects of Inner Semi-conductive Layer of Stator Bar on the Electric Field Intensity in Slot and Dielectric Loss Factor[J]. Insulating Materials, 2012, 45(4): 73.
- [21] 胡建林,黄泽,赵禹来,等. 电机定子线棒绝缘表面放电和内部放电特征对比研究[J]. 大电机技术,2023(4):11.
HU Jianlin, HUANG Ze, ZHAO Yulai, et al. Research on the Comparison of Surface Discharge and Internal Discharge of Stator Winding Insulation[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(4): 11.
- [22] 胡波,周进,黄绍波. 水轮发电机定子线棒或线圈介质损耗伪三电极测试方法研究[J]. 上海大中型电机,2017(1):57.
HU Bo, ZHOU Jin, HUANG Shaobo. Study on Pseudo Three Electrode Test Method for Dielectric Loss of Stator Bars or Coils of Hydrogenerators[J]. Shanghai Medium and Large Electrical Machines, 2011(1): 57.
- [23] GB/T 34665-2017. 电机线圈/绕组绝缘介质损耗因数测量方法[S].