

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

李园园.
风力发电机绝缘系统可靠性评定
方法探讨.
电机与控制应用,2021,48(8):90.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术，
辐射智能制造产业发展



· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址：上海市武宁路505号 手机：18918357509 电话：021-62574990-436

传真：021-62163904 邮箱：wangcj@seari.com.cn

风力发电机绝缘系统可靠性评定方法探讨

李园园^{1,2}

[1. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063;

2. 上海电器设备检测所有限公司, 上海 201401]

摘要: 风力发电正在快速发展。风力发电机作为发电机组的重要组成部分,其绝缘系统的可靠性对于整个风电机组的可靠性具有重要意义。与普通发电机相比,风力发电机引入变流器,绝缘系统所承受的应力不同,如高频脉冲电压、局部放电等。同时,风力发电机的运行环境较复杂,绝缘系统受高湿度、高温差、重盐雾等因素的影响。针对实际运行需求,介绍了风力发电机绝缘系统从不同维度出发的可靠性评定方法,主要包括长期耐热性评定、电应力耐久性评定以及环境可靠性评定。对各种方法进行分析,便于整机生产商根据实际需求选择合适的评定方法,提高风力发电机产品的可靠性。

关键词: 风力发电机; 绝缘系统; 长期耐热性; 电应力耐久性; 环境可靠性

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)08-0090-08

doi: 10.12177/emca.2021.067

Discussion on Reliability Evaluation Methods of Wind Generator Insulation System

LI Yuanyuan^{1,2}

[1. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China;

2. Shanghai Testing & Inspection Institute for Electrical Equipment, Shanghai 201401, China]

Abstract: With the rapid development of wind power generation, wind generator has become an important part of the generator sets. The reliability of the generator insulation system is of great significance to improving the reliability of the entire wind generator set. Compared with ordinary generators, wind generators introduce converter and the insulation system bears different stresses such as high-frequency pulse voltage and partial discharge. At the same time, the operating environment of wind generators is more complicated, so that the insulation system is affected by factors including high humidity, high temperature difference, heavy salt spray, etc. during long-term operation. In response to actual operating requirements, the reliability evaluation methods of wind generator insulation systems are introduced from different dimensions, including long-term heat resistance, electrical stress durability and environmental reliability. Various methods are analyzed, so that the complete machine manufacturer can choose the appropriate evaluation method according to the actual demand and improve the reliability of the wind generator products.

Key words: wind generator; insulation system; long-term heat resistance; electrical stress durability; environmental reliability

0 引言

风力发电是可再生能源领域中较成熟且具规模开发条件和商业化发展前景的发电方式之一,

可利用的风能在全球范围内分布广泛、储量巨大。随着全球能源形势趋紧及风电相关技术不断成熟、设备不断升级,加之保护和改善环境的需要,风力发电行业高速发展,近几年风力发电机的制

收稿日期: 2021-03-18; 收到修改稿日期: 2021-07-01

作者简介: 李园园(1991—),女,硕士,工程师,研究方向为绝缘材料及绝缘系统的检测。

造呈现大规模发展之势。随着风力发电的快速发展,对风电机组系统的可靠性也提出了更高的要求。风力发电机是发电机组的重要组成部分,发电机绝缘系统的可靠性对整个风电机组的可靠性具有重要意义。绝缘系统作为发电机的“心脏”,其性能可靠性直接影响整机的运行寿命,因此,近年来逐步引起各整机厂的重视^[1-2]。

由于引入了变流器,风力发电机绝缘系统与普通发电机绝缘系统所承受的应力不同,如高频脉冲电压、局部放电等,而绝缘系统的耐高频冲击能力对风力发电机尤为重要。风力发电机绝缘系统与普通发电机绝缘系统所使用的环境不同,有高温高湿、盐雾等特殊条件,因此绝缘系统的环境可靠性对风力发电机也特别重要^[3-5]。

本文根据风力发电机的运行工况,参考国内外现行标准,对风力发电机的绝缘系统可靠性评定方法进行了介绍与分析,便于整机生产商根据需求选择合适的评定方法。

1 评定方法概述

风力发电机长期使用过程中会存在较高的温升,因此绝缘系统需要有较高的长期耐热性。对绝缘系统进行长期耐热性评定,可以获得绝缘系统的温度指数和热寿命曲线。整机生产商设计时可根据实际运行温升和寿命需求,选择合适的绝缘系统。

变流器产生的重复脉冲电压对风力发电机绝缘系统产生电损伤,长时间的电应力作用下绝缘系统会发生电击穿,达到寿命终点。对绝缘系统进行电应力耐久性评定,可以获得其电寿命方程。整机生产商根据发电机运行中的脉冲电压,可以推算绝缘系统的理论电寿命,为评估设计可靠性和运行可靠性提供一定依据。

风力发电机的运行环境条件较为复杂,包括高湿度、高温差、重盐雾和高污秽等,因此对绝缘系统的环境可靠性评估也至关重要。

2 长期耐热性评定方法

2.1 理论依据

阿伦尼乌斯方程用以评定化学反应速率与温度之间的关系。热氧化分解过程可以用阿伦尼乌斯方程描述:

$$k(T) = C \exp[-E_{ad}/(RT)] \quad (1)$$

对数形式如下:

$$\ln[k(T)] = -E_{ad}/(RT) + C_A \quad (2)$$

式中: $k(T)$ 为反应速率常数; E_{ad} 为活化能,单位为 J/mol; T 为温度,单位为 K; R 为气体常数,单位为 J/(mol·K); C 、 C_A 为常数。

绝缘系统热寿命与热力学温度符合阿伦尼乌斯方程,可表示为回归线方程:

$$\lg \tau = A + B/T \quad (3)$$

式中: τ 为热寿命; A 为常数; B 为系数。

式(3)表明 $\lg \tau$ 与 $1/T$ 呈线性关系。对绝缘系统进行不同温度下的热寿命评估,可以对评估结果进行阿伦尼乌斯坐标($\lg \tau - 1/T$)的线性回归分析,得到评估系统的热寿命方程,并在回归线上求出 20 000 h 对应的温度,得到温度指数(T_i)或根据实际运行温度推算长期运行寿命。绝缘系统的耐热等级划分如表 1 所示。

表 1 绝缘系统耐热等级^[6]

耐热等级	等级温度/℃
105(A)	105
120(E)	120
130(B)	130
155(F)	155
180(H)	180
200(N)	200

2.2 评定方法介绍

2.2.1 常规方法(三点法)

散绕绕组风力发电机绝缘系统的热老化评定标准依据 GB/T 17948.1—2018^[7],一般选择散绕模拟线圈作为试验样品,需要至少在 3 个温度,每个温度至少 10 个试样条件下对绝缘系统进行热寿命评定。

成型绕组风力发电机绝缘系统的热老化评定标准依据 GB/T 17948.3—2017^[8],选择成型模拟线圈作为试验样品,需要至少在 3 个温度,每个温度至少 5 个试样条件下对绝缘系统进行热寿命评定。

根据评定结果对 3 组或以上老化温度和老化寿命进行拟合,得到热寿命方程,计算绝缘系统的温度指数。具体评定流程如图 1 所示。

热老化分周期的加热方式一般选择烘箱加热,且使用强制通风的烘箱,通风可将老化期间绝缘附件可能的残存分解物带走。虽然烘箱具有明

显的缺点,但经验表明烘箱可提供方便且经济的热老化途径。烘箱法可使绝缘结构所有部分经受完整的老化温度,而在实际运行时大部分绝缘在比热点低很多的温度下运行。如果适合,可采用非常接近模拟运行条件的更直接的方法:电流直接加热、正/反转试验(电机试验)等。

热老化分周期推荐的老化温度和相对应的暴露周期如表 2 所示。表 2 中的数值是按老化温度每降低 10 K 寿命加倍得到的近似值。应选择合适的老化温度和分周期的暴露时间,保证最低试验温度不超过设计等级温度的 25 K,且应获得约 5 000 h 或更长的平均试验寿命,最高试验温度下应获得至少 100 h 的平均试验寿命。每个老化温度的分周期长度的选择依据是可以产生约 10 个周期的平均寿命。老化温度应分别至少有 20 K 间隔,但如果采用的老化温度点多于 3 个,温度间隔可降低 10 K。

散绕绕组和成型绕组风力发电机绝缘系统的电性能诊断试验电压分别如表 3 和表 4 所示。

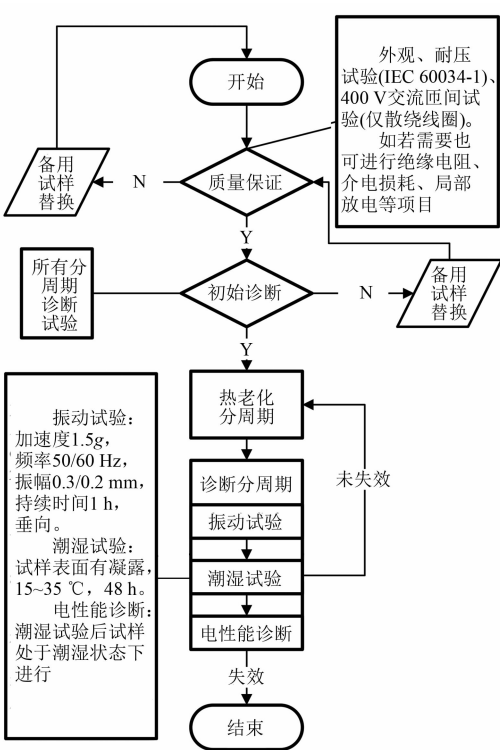


图 1 散绕/成型绕组长期耐热性评定流程

表 2 推荐的热老化温度和分周期时间

预计等级	105	120	130	155	180	200
分周期天数/d	建议老化温度 $T_A/^\circ\text{C}$					
1~2	170~180	185~195	195~205	220~230	245~255	265~275
2~3	160~170	175~185	185~195	210~220	235~245	255~265
4~6	150~160	165~175	175~185	200~210	225~235	245~255
7~10	140~150	155~165	165~175	190~200	215~225	235~245
14~21	130~140	145~155	155~165	180~190	205~215	225~235
28~35	120~130	135~145	145~155	170~180	195~205	215~225
45~60	110~120	125~135	135~145	160~170	185~195	205~215

表 3 散绕绕组风力发电机绝缘系统的电性能诊断试验电压

运行额定电压 U_N	建议工频试验电压		
	对地	线圈间	导体间
≤ 400	400	400	110
401~690	690	690	110
> 690	$2U_N$	$2U_N$	110

表 4 成型绕组风力发电机绝缘系统的电性能诊断试验电压

试验部位	试验项目	试验参数
主绝缘	对地耐压	$2U_N$ 或 1 kV, 取较大者, 60 s
匝间绝缘	平行匝试样 匝间耐压	$0.2 \sqrt{2} U_N + 1 \text{ kV}$, 60 s
	菱形线圈 匝间耐压	$0.2 \sqrt{2} U_N + 1 \text{ kV}$, 60 s
	匝间冲击	$0.65(4U_N + 5 \text{ kV})$, 5 次
	标准产品线圈 匝间冲击	$0.65(4U_N + 5 \text{ kV})$, 5 次

2.2.2 快速评定法(单点法)

JB/T 1544—2015^[9]介绍了电气绝缘浸渍漆和漆布的快速评定方法。依据此标准可以通过热重分析(TGA)方法和单点热老化试验进行温度指数的快速评定。此方法目前在绝缘系统的热评定上进行了扩展使用,可以对长期耐热性进行粗略估计。

依据标准 JB/T 1544—2015 的方法,对绝缘材料粉末在 3 K/min 或 5 K/min 的升温速率下,在常压干燥空气气氛中进行 TGA 分析。从热重曲线上,取失重 5%~50%(间隔 5%)所对应的 10 个温度数值,按经验公式计算表观裂解活化能 E_p :

$$E_p = E_0 + RC_0 \sum_{n=1}^{10} t_n \left(\frac{\Delta W}{W_a} \right)_n^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: E_0 为常数,单位为 J/mol; R 为气体常数,取值 8.314 J/(K·mol); C_0 为系数; T_n 为对应每个 W/W_a 的温度值,单位为℃; ΔW 为试样在 T_n 下的失重质量,单位为 mg; W_a 为试样总质量,单位为 mg; $\Delta W/W_a$ 为失重比例。

热寿命曲线斜率按下式计算:

$$b = \frac{E_p}{2.303R} = \frac{E_p}{19.147} \quad (5)$$

通过 TGA 分析,可得到寿命方程 $\lg \tau = a + b/T$ 的斜率,然后对绝缘材料进行常规老化评定中高温点的热老化试验,根据高温点老化试验温度和高温点寿命,结合寿命方程斜率即可推断出绝缘材料的寿命方程。

3 电应力耐久性评定

3.1 理论依据

依据 GB/T 22566—2017^[10] 进行绝缘系统电老化试验,确定待评结构的脉冲电压与寿命间的关系。一般情况下,电压寿命与电压幅值的关系可通过倒幂定律表示:

$$L = kU^{-n} \quad (6)$$

式中: L 为在给定概率下的试样失效冲击次数; U 为所施加的脉冲电压; n 为电压老化系数(VEC); k 为常数。

在所选择的电压下,对每个试样进行耐久性试验,确定失效冲击次数或失效时间。使用两参数韦布尔函数处理失效次数或失效时间(完整试

验或截尾试验)。估计每个试验电压水平下的形状参数(中值、平均值或其他规定的百分数),在双对数或半对数坐标系上作图,得到电寿命方程,并推算运行电压下的长期使用寿命。

3.2 试验方法

3.2.1 工频电压耐久性试验

依据标准 GB/T 17948.4—2016^[11] 进行工频电压耐久性评定。电应力耐久性评定流程如图 2 所示,一般选择至少 3 个电压点,每个电压点至少 5 个试样进行试验。

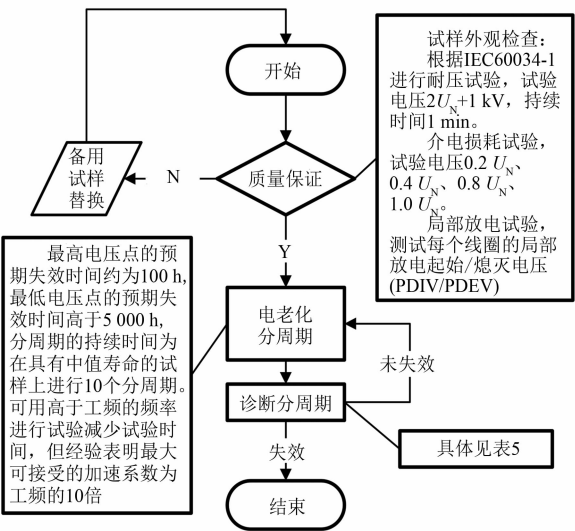


图2 电应力耐久性试验流程

表5 诊断试验参数(工频电老化)

试验部位	试验项目	试验参数
主绝缘	冲击试验	连续施加 3 次 1.2/50 μs(冲击波形上升时间和下降时间)、峰值 4UN+5 kV 的冲击电压
	工频耐压	在线圈与地之间施加(2UN+1 kV) 的电压 1 min 后,施加电压以 1 kV/s 速率升到 2(2UN+1 kV), 随即以 1 kV/s 的速率降至 0
匝间绝缘	匝间冲击	连续施加 5 次上升时间 0.2 μs、峰值 0.65(4UN+5 kV) 的冲击电压
	匝间耐压	1.5UN/匝数,或自定义电压,1 min

电老化分周期试验后进行诊断分周期试验。诊断分周期试验具体试验项目和参数如表 5 所示,可根据实际情况进行诊断项目选择。

在电老化分周期试验和诊断试验期间,试样任何部分的失效构成了整个结构的失效。记录失

效试样的电老化累计时间;其他试样继续进行试验,直至全部失效。

3.2.2 重复脉冲电压耐久性试验

依据标准 GB/T 22566—2017^[10]进行重复脉冲电压耐久性评定。试验冲击电压上升时间要求 0.04~1.00 μs,重复频率不超过 10 kHz,波形为方波或三角波。重复脉冲电应力耐久性评定流程如图 2 所示,其中质量保证试验和诊断试验可根据需求进行试验项目和试验参数选择,具体项目包括工频耐压、介电损耗和局部放电等。

4 环境可靠性评定

由于风力发电机运行工况复杂性,涉及温度变

化、盐雾、低气压、振动等,因此发电机绝缘系统的环境可靠性评定需要根据使用环境进行评定项目的选择。风力发电一般分为陆地风电和海上风电。

依据使用条件,陆地风电用风力发电机绝缘系统的环境可靠性评定一般需进行的检测项目包括温度变化试验、沙尘试验、霉菌试验等;海上风电用风力发电机绝缘系统的环境可靠性评定一般需进行的检测项目包括温度变化试验、湿热试验、盐雾试验、霉菌试验等^[12]。

环境适应性试验结束后需对试样进行电气性能诊断,具体项目可根据实际情况进行选择。根据实际情况和标准要求,目前行业内使用较多的试验参数如表 6 所示^[13-17]。

表 6 环境可靠性试验参数

序号	试验项目	试验参数	备注
1	温度变化	高温 125 ℃,低温-55 ℃,持续时间 3 h,升降温速率 3 K/min,循环次数 12 次	—
		高温 140 ℃,低温-20 ℃,持续时间 3 h,升降温速率 3 K/min,循环次数 21 次	—
		高温 40 ℃,低温-20 ℃,持续时间 3 h,升降温速率 11 K/min,循环次数 2 次	NB/T 31094—2016 ^[13]
2	湿热试验	交变湿热,常温 25 ℃/95%~100% RH,高温阶段 55 ℃/93% RH,循环测试 6 次	—
		交变湿热,高温 55 ℃,循环测试 6 次	NB/T 31094—2016 ^[13]
		恒定湿热,40 ℃,93% RH,96 h	NB/T 31094—2016 ^[13]
3	盐雾试验	恒定盐雾(GB/T 2423.17—2008 ^[14]),168 h	海上风电
		恒定盐雾(GB/T 2423.17—2008 ^[14]),96 h	海上风电
		交变盐雾(GB/T 2423.18—2012 ^[15]),严酷等级 2	海上风电 NB/T 31094—2016 ^[13]
4	沙尘	水平吹尘(GB/T 2423.37—2006 ^[16]),吹尘速率要求 30 m/s,24 h	陆地风电
5	霉菌试验	29 ℃,>90% RH,28 d	GB/T 2423.16—2008 ^[17] ,不超过 2a 级

标准 GB/T 37079—2018^[18]中提到逆幂律模型。该模型既适用于恒温条件下的机械疲劳循环,也适用于由温度循环引起的机械应力产生的疲劳。恒温机械疲劳模型为

$$F_A = \frac{N_{tu}}{N_{tu}} = \left(\frac{\Delta \varepsilon_t}{\Delta \varepsilon_u} \right)^B \quad (7)$$

式中: F_A 为加速因子;下标 u 和 t 分别表示使用和试验; $\Delta \varepsilon_t$ 为试验疲劳, $\Delta \varepsilon_u$ 为正常使用疲劳,二者均由弯曲产生的位移、拉紧产生的延伸或者其他机械疲劳决定; B 为与材料相关的系数。

温度循环疲劳模型为

$$F_A = \frac{N_{tu}}{N_{tu}} = \left(\frac{\Delta T_t}{\Delta T_u} \right)^B \quad (8)$$

式中: ΔT_t 为温度循环试验温差; ΔT_u 为正常使用

中的温差。

以上模型仅可对绝缘结构单个环境应力耐力进行评定,不能同时评定多个环境应力耐力,因此无法对绝缘系统进行环境可靠性寿命评定。目前,评定绝缘结构环境可靠性时需要与已有运行经验的系统进行对比,得到变更系统或新系统的评定结果。一般情况下,对所选试验项目进行周期循环性试验,通过对比绝缘系统的电性能诊断结果,达到评定目的。

5 风力发电机绝缘系统可靠性评定的方案及实施

5.1 可靠性评定方案

根据使用特性,风力发电机绝缘系统的可靠

性评定需包含 3 部分:热寿命评定、电压耐久性评定、环境可靠性评定。

待评绝缘系统的预估温度等级为 180 ℃,额定电压为 1 kV,电压峰-峰值 $U_{p-p}=3\text{ kV}$ 。

5.2 热寿命评定-三点热老化

5.2.1 试验设备和试验方法

本次试验所用设备包括热老化试验箱、机械振动试验台、潮湿试验箱以及交流耐压设备等。

本次试验依据 GB/T 17948.3—2017 进行长期耐热性评定,根据预估温度等级和推荐试验温度、分周期,选择在以下 3 个温度和分周期下进行热老化试验:205 ℃,35 天;225 ℃,10 天;245 ℃,3 天。每个温度下试验 5 根完整的线圈。

振动和潮湿诊断试验依据标准进行,电性能诊断试验选择匝间冲击和对地耐压试验。匝间冲击耐压试验电压为 $0.65(4U_N+5\text{ kV})$,持续 5 次;对地耐压试验施加的电压为 $2U_N$,持续 1 min。

5.2.2 试验结果

分别在 3 个温度点下进行热老化试验,每个温度点的试样数量为 5 个。

失效时间确认过程如下。

各温度点进行分周期(τ)诊断试验: $0=\tau_0<\tau_1<\tau_2<\cdots<\tau_l$ 。

在某温度应力水平下进行寿命试验,时间到 τ_j 时($0<j\leq l$),对样品进行诊断,判据其是否失效,得到在测试周期(τ_{j-1},τ_j)内的失效个数 r_j 。采用下式计算在(τ_{j-1},τ_j)内第 h 个失效试样的失效时间:

$$\tau_{j,h} = t_{j-1} + h \frac{t_j - t_{j-1}}{r_j + 1}, h = 1, 2, \cdots, r_j \quad (9)$$

式中: t_{j-1} 未失效热老化周期的总累计时间; t_j-t_{j-1} 为失效周期的时间。

各温度下的试验结果如表 7 所示。

上述失效时间确认方法为可靠性领域常用方法。耐热性评定标准中失效时间计算依据为,每个试样热寿命为未失效热老化周期的总累计时间与失效周期的一半时间之和。

根据热老化试验结果,利用阿伦尼乌斯原理对试验温度和热寿命进行拟合,即可得到表 8 所示分析结果。试样热寿命曲线如图 3 所示。

表 7 热老化试验结果

试验温度/℃	失效周期序号	试样热寿命/h
205	7	5 250
	8	6 160
	7	5 460
	7	5 670
	8	6 440
225	11	2 448
	10	2 280
	11	2 496
	11	2 544
	11	2 592
245	15	1 044
	13	882
	13	900
	10	684
	13	918

表 8 分析结果

分析内容	分析结果
热寿命方程	$\lg\tau=5\,057.970\,7/T-6.801\,6$
相关系数	0.997
温度指数 $T_i/^\circ\text{C}$	182
半寿命温差(HIC)/K	12.7
活化能/($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	96.9
活化能/eV	1.004

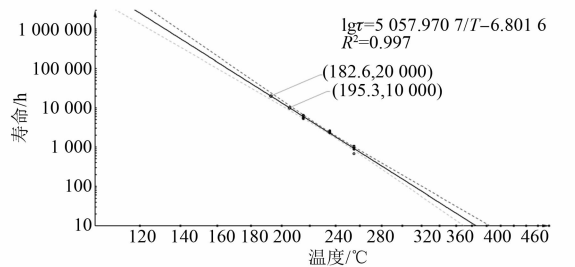


图 3 热寿命曲线

5.3 电压耐久性评定-重复脉冲电压

5.3.1 试验设备和试验方法

工频耐压设备:输入电压 220 V,输入电流 22.7 A,额定容量 5 kVA,输出电压 25 kV,输出电流 100 mA。

高频脉冲绝缘结构测试仪:最高试验电压峰-

峰值 20 kV;脉冲频率 1 kHz;上升时间 (1) ≤ 100 ns(负载总容量 ≤ 500 pF), (2) ≤ 200 ns(负载总容量 ≤ 1 500 pF), (3) ≤ 300 ns(负载总容量 ≤ 2 500 pF);脉冲占空比 50%,脉冲波形为方波,脉冲极性双极性。

依据标准 GB/T 22566—2017^[10] 分别选择在 $2U_{p-p}$ 、 $4U_{p-p}$ 、 $6U_{p-p}$ 下进行重复脉冲耐久性试验,试验频率为 1 kHz。先进行耐压诊断试验,通过后在选定电压下进行老化试验,直至试样击穿失效,记录累计电老化寿命。

5.3.2 试验结果及分析

重复脉冲电老化试验结果如表 9 所示。

表 9 电老化试验结果		
试验电压/kV	累计电寿命/h	特征电寿命 (90% 置信界限 韦布尔分布)/h
6	8 128	8 283
	8 232	
	8 321	
	8 203	
	8 342	
12	390	404
	396	
	413	
	401	
	400	
18	30.1	51.8
	49.8	
	51.2	
	53.6	
	57.0	

绝缘系统在对应电压下 90% 置信界限下的特征电寿命分析图如图 4 所示。

对以上电老化试验结果进行线性回归分析,得到绝缘结构的电寿命方程,计算电压峰-峰值下的电寿命,分析结果如表 10 所示。绘出电寿命曲线图,如图 5 所示。

表 10 电寿命方程及电寿命	
分析内容	分析结果
电寿命方程 (50 Hz)	$L=43.127\times U^{-0.217}$
相关系数	0.999 2
U_{p-p} 下理论电寿命/a	33

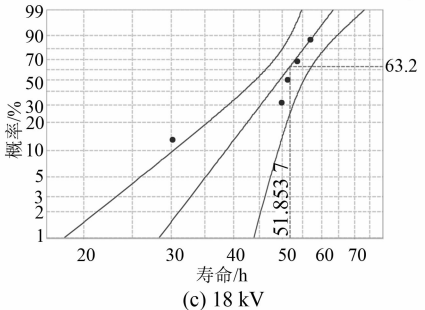
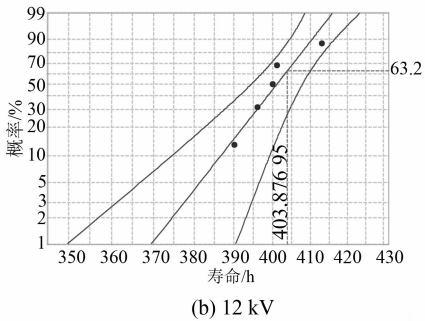
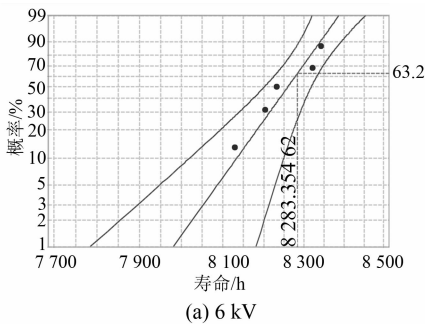


图 4 特征电寿命分析图

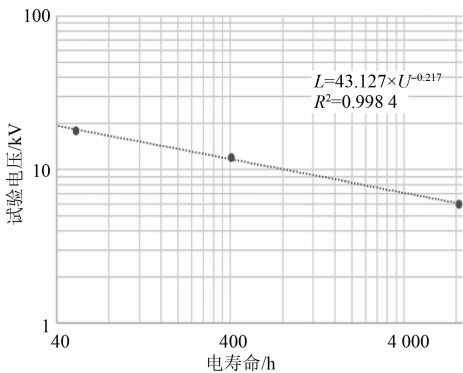


图 5 电寿命曲线图

5.4 环境可靠性评定

根据风电发电机实际使用环境调研以及其使用情况,选择环境可靠性评定项目及参数。海上风电发电机绝缘系统的环境可靠性评定内容主要包括温度变化试验、振动试验、盐雾试验、沙尘试

验等。具体试验参数和流程如图 6 所示。

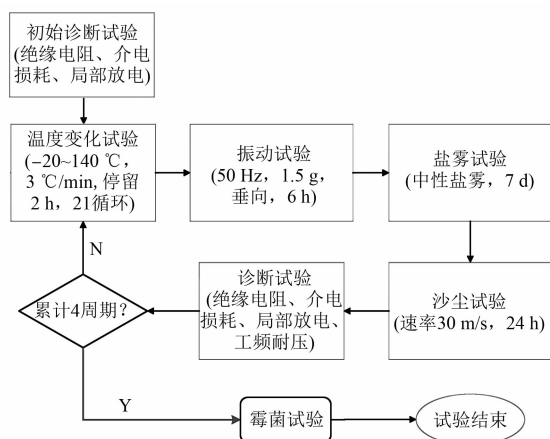


图 6 环境可靠性评定流程

环境可靠性评定目前尚未有成熟的模型用于寿命计算,因此主要是与已有一定运行经验的系统进行对比评价,确认新型系统的环境可靠性。

6 结 语

风力发电机是发电机组的重要组成部分,其绝缘系统的可靠性对于整个风电机组的可靠性具有重要意义。目前常用的可靠性评定包括长期耐热性、电应力耐久性以及环境可靠性。

长期耐热性的评定主要依据原理为阿伦尼乌斯方程,根据评定结果可以得到绝缘系统的热寿命方程,推算出使用温度下的热寿命。具体评定方法主要包括常规方法和快速方法。其中前者评定周期较长,资源消耗较大,但准确性较高,国内国际认可度高;后者评定周期短,但准确度较低,国际认可度较低,只能作为初步筛选的方法。

电压耐久性的评定主要依据电压寿命与电压幅值的倒幂定律,根据评定结果可以得到绝缘系统的电寿命方程,推算额定电应力下的电寿命。主要包括工频电压耐久性评定和重复脉冲电压耐久性评定。工频耐久性评定结果一致性较好,但评定的电应力和绝缘结构实际承受的脉冲电应力有一定区别。重复脉冲电压耐久性评定模拟绝缘结构实际承受的脉冲应力,但目前设备制造技术不稳定,设备偏差容易引起一定的结果误差。

环境可靠性评定目前没有成熟的理论依据,因此一般通过与已有运行经验的系统进行对比,对变更系统或新系统进行评定,评定项目和参数

需根据实际使用情况进行选择。

【参考文献】

- [1] 国家能源局. 2018 年风电并网运行情况[J]. 中国机电工业, 2019(3): 28.
- [2] 吕鑫, 祁雨霏, 董馨阳, 等. 2020 年光伏及风电产业前景预测与展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2020(2): 20.
- [3] 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.
- [4] 刘军伟, 崔明, 卢江跃, 等. 风力发电机绝缘失效原因及改进措施[J]. 机电工程技术, 2020, 49(8): 281.
- [5] 丛啸桀, 李丹, 王小明, 等. 海上中速永磁风力发电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 76.
- [6] 中国电器工业协会. GB/T 11021—2014. 电气绝缘 耐热性和表示方法[S]. 2014.
- [7] 中国电器工业协会. GB/T 17948.1—2018. 旋转电机 绝缘结构功能性评定 散绕组试验规程 热评定和分级[S]. 2018.
- [8] 中国电器工业协会. GB/T 17948.3—2017. 旋转电机 绝缘结构功能性评定 成型绕组试验规程 旋转电机绝缘结构热评定和分级[S]. 2017.
- [9] 机械工业联合会. JB/T 1544—2015. 电气绝缘浸渍漆和漆布快速热老化 试验方法-热重点斜法[S]. 2015.
- [10] 中国电器工业协会. GB/T 22566—2017. 电气绝缘材料和系统 重复电压冲击下电气耐久性评定的通用方法[S]. 2017.
- [11] 中国电器工业协会. GB/T 17948.4—2016. 旋转电机 绝缘结构功能性评定 成型绕组试验规程 电压耐久性评定[S]. 2016.
- [12] 刘晓辉, 高人杰, 薛宇. 浮式风力发电机组现状及发展趋势综述[J]. 分布式能源, 2020, 5(3): 39.
- [13] 中国电器工业协会. NB/T 31094—2016. 风力发电设备海上特殊环境条件与技术要求[S]. 2016.
- [14] 全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会. GB/T 2423.17—2008. 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 Ka: 盐雾[S]. 2008.
- [15] 全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会. GB/T 2423.18—2012. 环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 Kb: 盐雾, 交变(氯化钠溶液)[S]. 2012.

(下转第 105 页)

用,提出一种基于形态学的贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网单端电流方向暂态保护方法,通过大量故障仿真验证了所提保护方法的可行性,主要结论如下:

(1) 通过对故障电流线模分量进行 MMG 变换,可以得到故障电流线模分量波形突变点的极性:若极性为负,判定为本侧区外故障;若极性为正,判定为区内故障或对侧区外故障。

(2) 当判定为区内故障或对侧区外故障时,通过形态谱运算对故障电流线模分量进行处理,并变换归一化后的形态谱到频域。通过比较频域下的形态谱值 Q_1 与阈值 Q 的大小,判断故障发生位置:当形态谱值 Q_1 大于阈值 Q 时,为区内故障;当形态谱值 Q_1 小于阈值 Q 且大于 0 时,为对侧区外故障。

【参考文献】

- [1] 陈民武,宋雅琳,刘琛,等. 同相供电系统潮流控制器可靠性建模与冗余分析[J]. 电网技术,2017,41(12): 4022.
- [2] SHU Z L, XIE X F, JING Y Z. Advanced co-phase traction power supply simulation based on multilevel converter [C] // Proceedings of the 2011 2nd International Congress on Computer Applications and Computational Science Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012.
- [3] 何晓琼,彭旭,周瑛英,等. 一种新型同相牵引供电系统均流性能研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(4): 53.
- [4] 程宏波,李新原,王勋,等. 高铁牵引供电系统故障的 Logistic 关联分析[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(10): 2065.
- [5] 张秀峰,高仕斌,钱清泉,等. 基于阻抗匹配平衡变压器和 AT 供电方式的新型同相牵引供电系统[J]. 铁道学报,2006,28(4): 32.
- [6] 陈仕龙,曹蕊蕊,毕贵红,等. 基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电力自

- 动化设备,2016,36(1): 67.
- [7] 宋国兵,冉孟兵,褚旭,等. 利用高低频电流幅值比的 VSC-HVDC 输电线路全线速动保护新原理[J]. 电网技术,2014,38(5): 1402.
- [8] 李建平. 贯通式同相牵引供电系统牵引网行波传播特性及保护初探[D]. 昆明: 昆明理工大学,2017.
- [9] 赵四洪,刘浩,陈仕龙,等. 贯通式同相牵引直接供电系统牵引网边界频率特性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(3): 758.
- [10] 胡景瑜. 贯通同相供电系统潮流控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学,2014.
- [11] 陈仕龙,杨鸿雁,毕贵红,等. 贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备,2021,41(6): 192.
- [12] 常非,赵丽平,冯金博. 五电平交直交变换器在贯通同相供电中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(1): 26.
- [13] 陈仕龙,束洪春,谢静,等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11): 134.
- [14] 束洪春,王超,张杰,等. 基于形态学的 HVDC 线路故障识别与定位方法研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(4): 6.
- [15] 吴青华,张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化,2003,27(7): 45.
- [16] 杨庆,王荆,陈林,等. 计及冲击电晕的输电线路雷电绕击和反击智能识别方法[J]. 高电压技术,2011,37(5): 1149.
- [17] 胡爱军,孙敬敬,向玲. 振动信号处理中数学形态滤波器频率响应特性研究[J]. 机械工程学报,2012,48(1): 98.
- [18] 顾红伟,马季,孙振权,等. 数学形态滤波在局部放电信号分析中的应用研究[J]. 高压电器,2011,47(9): 57.
- [19] 郭文杰,林飞,郑琼林. 三相电压型 PWM 整流器的级联式非线性 PI 控制[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2): 138.

(上接第 97 页)

- [16] 全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会. GB/T 2423.37—2006. 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 L: 沙尘试验[S]. 2006.
- [17] 全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技

术委员会. GB/T 2423.16—2008. 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 J 和导则: 长霉[S]. 2008.

- [18] 中华人民共和国工业和信息化部. GB/T 37079—2018. 设备可靠性 可靠性评估方法[S]. 2018.