



中华人民共和国国家标准

GB/T 29311—2020/IEC 61251:2015
代替 GB/T 29311—2012

电气绝缘材料和系统 交流电压耐久性评定

Electrical insulating materials and systems—
AC voltage endurance evaluation

(IEC 61251:2015, IDT)

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 Ⅲ

引言 Ⅳ

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义、符号..... 1

4 电压耐久性 2

5 试验方法 5

6 电压耐久性评定 8

附录 A（资料性附录） 威布尔分布 10

参考文献 12

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 29311—2012《电气绝缘材料 交流电压耐久性评定 通则》，与 GB/T 29311—2012 相比，主要技术变化如下：

- 修改了“范围”(见第 1 章,2012 年版的第 1 章)；
- 修改了“规范性引用文件”(见第 2 章,2012 年版的第 2 章)；
- 修改了术语“电压耐久性”“寿命”的定义(见 3.1.1 和 3.1.2,2012 年版的 3.1.1 和 3.1.2)；
- 删除了术语“电寿命”(见 2012 年版的 3.1.3)；
- 增加了符号“ α ”(见 3.2)；
- 删除了符号“ E_s, n_i, t_{p0}, ν' ”(见 2012 年版的 3.2)；
- 修改了“试验方法的概述”(见 5.1,2012 年版的 5.1)；
- 修改了“常规电压耐久性试验”(见 5.2.1,2012 年版的 5.2.1)。

本标准使用翻译法等同采用 IEC 61251:2015《电气绝缘材料和系统 交流电压耐久性评定》。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 29310—2012 电气绝缘击穿数据统计分析导则(IEC 62539:2007,IDT)

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会(SAC/TC 301)归口。

本标准起草单位：浙江荣泰科技企业有限公司、烟台民士达特种纸业股份有限公司、苏州巨峰电气绝缘系统股份有限公司、机械工业北京电工技术经济研究所、苏州太湖电工新材料股份有限公司、四川东材科技集团股份有限公司、苏州贝得科技有限公司、中车永济电机有限公司、安徽威能电机有限公司、红光电气集团有限公司、东方电气集团东方电机有限公司、西安交通大学、国网安徽省电力有限公司电力科学研究院、泰州市第三绝缘材料厂。

本标准主要起草人：刘亚丽、郑敏敏、陈昊、王志新、夏宇、井丰喜、李杰霞、李培新、雷平振、林中华、庄治民、张跃、刘学忠、秦少瑞、耿涛、王莹、袁娟。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 29311—2012。

引 言

本标准涵盖绝缘材料和系统。电压耐久性试验用于比较和评定电气绝缘材料和系统。确定电气绝缘材料和系统的交流电压耐久性十分复杂,因为电压耐久性试验结果受多种因素影响。本标准提出用于电压耐久性试验简单设计及分析的统一方法。

电气绝缘材料和系统 交流电压耐久性评定

1 范围

本标准阐述了电气绝缘材料与系统电压耐久性试验相关的诸多因素,描述了电压耐久性曲线,列举了试验方法及其局限性,界定了电压耐久性的术语,给出了根据试验结果评定绝缘材料和系统的正弦交流电压耐久性导则。

本标准适用于电压频率为 20 Hz~1 000 Hz 的交流电压下绝缘材料和系统的耐久性评定。

本标准所使用的试验原理也适用于其他波形电压。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 62539 电气绝缘击穿数据统计分析导则(Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data)

3 术语和定义、符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

电压耐久性 voltage endurance; VE

固体绝缘材料和系统耐受电压能力的测量。

注:本标准只考虑交流电压。

3.1.2

寿命 life

介电击穿时间。

3.1.3

电压耐久性系数 voltage endurance coefficient; VEC

双对数电压耐久性坐标图中直线斜率的倒数值。

3.1.4

试样 specimen

用来评估一个或多个物理特性,具有代表性的试验对象。

3.1.5

样品 sample

从同一生产批次中随机抽取的名义上相同的试样。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

c, c' :反幂函数模型常数。

E :电应力。

E_0 :短时电气强度。

E_t :电应力阈值。

f :频率。

h, k :指数模型常数。

L :寿命。

m :威布尔分布的尺度参数(单个变量)。

M :广义威布尔分布的尺度参数(两个变量)。

n :符合电压耐久性系数的反幂函数模型应力指数。

n_d :非常数的 VEC。

R :尺寸比。

t :时间。

t_c :恒定应力下介电击穿时间。

t_o :恒定应力 E_0 下介电击穿时间。

t_p :递增应力的介质电穿时间。

$\tan \delta$:介质损耗因数。

α :恒定应力下介电击穿时间的威布尔分布尺度参数(63.2%)。

β :恒定应力下介电击穿时间的威布尔分布形状参数。

γ :递增应力下介电击穿电场的威布尔分布形状参数。

4 电压耐久性

4.1 电压耐久性试验

为了评定绝缘材料或系统的电压耐久性,要测试多个试样在交流电压下的介电击穿时间。实际上,在不同的电压下测试几组包含多个试样的样品可以揭示施加电压对介电击穿时间的影响。每种样品的算术平均介电击穿时间是在该电压下测试的所有试样的介电击穿的平均时间,一定百分比的试样的击穿时间是相同概率百分比的介电击穿的估算时间。

数据的统计处理(分析法或者图表法)可以得到更多信息,例如,其他的失效百分比或者置信区间,可能的话,也可以确定其概率分布类型(例如高斯、威布尔、对数正态分布等)。

4.2 电应力

通常,在电压耐久性试验中采用电应力(每单位厚度的电压)而不是电压。

对于均匀电场,电应力可通过电压(有效值)除以试样的厚度得出。

对于非均匀电场,最大电压值应由使用方决定。

4.3 电压耐久性(VE)图

电压耐久性曲线为介质击穿时间(寿命)与电应力的曲线图,在 VE 图中,纵坐标是电应力,为线性或对数形式;横坐标为介质电穿时间,通常为对数形式。由于电压耐久性曲线可以清晰完整地表达规定试验条件下试样的电压耐久性评定,因此,电压耐久性曲线是电压耐久性试验的最终结果。为使试验具最大意义,材料或系统在相同的厚度、电极、温度、湿度和大气环境下进行对比,或由使用方确认对比条件。

精确绘制 VE 图需要进行三个以上不同电压下的测试,并且在某一电压下需要进行一次或多次测

试,以确保至少一次测试失效时间大于 1 000 h。在任何情况下,绘制 VE 图至少需要进行三次测试。

电压耐久性图可能是直线或曲线,若为曲线,它的趋势可以近似为几个直线区域,有时,初始部分为短时低斜率区域,中间部分(可能很长时间)为斜率陡峭的区域,最后部分趋于水平(见图 1)。不同材料或系统的电压耐久性曲线形状可能有很大的变化。使用图 1 曲线时,VEC 不是恒定的,且 VEC 在不同时间是不同的(见图 2 的 n_d)。

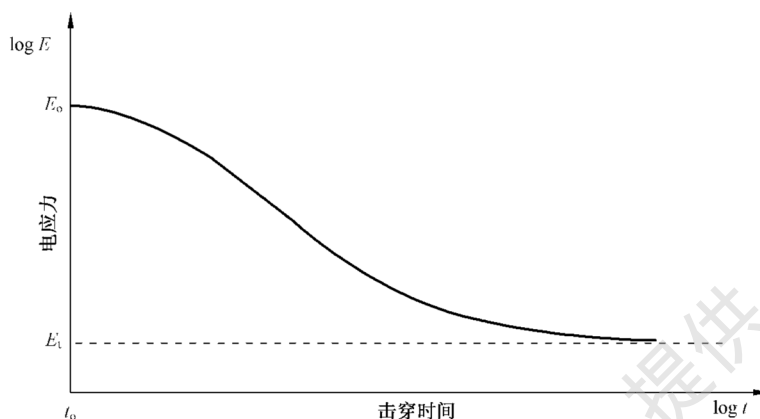


图 1 常规电压耐久性曲线

4.4 短时电气强度

通过电压线性增加,测量短时电气强度。本标准中,试验持续时间约为一分钟到几十分钟。被测试样的电气强度平均值为 E_0 。

电气强度试验结果(或递增电压试验结果)不能直接记录在 VE 图中,代之,使用短时电气强度 E 。(或非常接近 $0.9E$ 。或者协商一致的电气强度)做相同电应力下的恒定电压试验用以测定该电应力下的介电击穿时间 t_0 。在 VE 图中, (E_0, t_0) 为 VE 曲线的起点,在 5.5 中给出了此方法更加详细的说明。然而,当使用此方法时,应注意下列事项:

- 电气强度试验应在相同的环境条件(如湿度、温度等)、相同的试验单元和采用相同的试验方法下进行;
- 应检查并记录被测试样、击穿路径及试样介电击穿的条件,以用于后续试验结果分析。确保试样在高和较低的电应力下发生失效的类型相同。

4.5 电压耐久性系数(VEC)

VE 曲线的斜率 n 是绝缘材料或系统对电应力响应的反映,是无量纲参数。对斜率较小的 VE 曲线(如 VEC 数值较大),电应力小幅降低会使寿命大幅提高。斜率的倒数与式(1)中的指数值 n 一致,VEC 值大未必对应较高的电气强度。如果材料的短时电气强度高,足以弥补电压耐久性的不足,可能会出现相同电应力下低 VEC 材料的介电击穿时间长。因此,应注意 n 值的选择与高的平均电应力相对应,以保证材料良好的电压耐久性。最重要的是,在试验期间保持其长时间的电气强度。

4.6 非常数的 VEC(n_d)

如果 VE 线在双对数坐标系中为曲线,则可通过曲线上任意一点的切线测量斜率。按第 5 章描述的使用寿命模型,任意的电应力,对应在曲线上的一点,非常数的电压耐久性系数 n_d 为该点上曲线斜率倒数的绝对值(见图 2)。

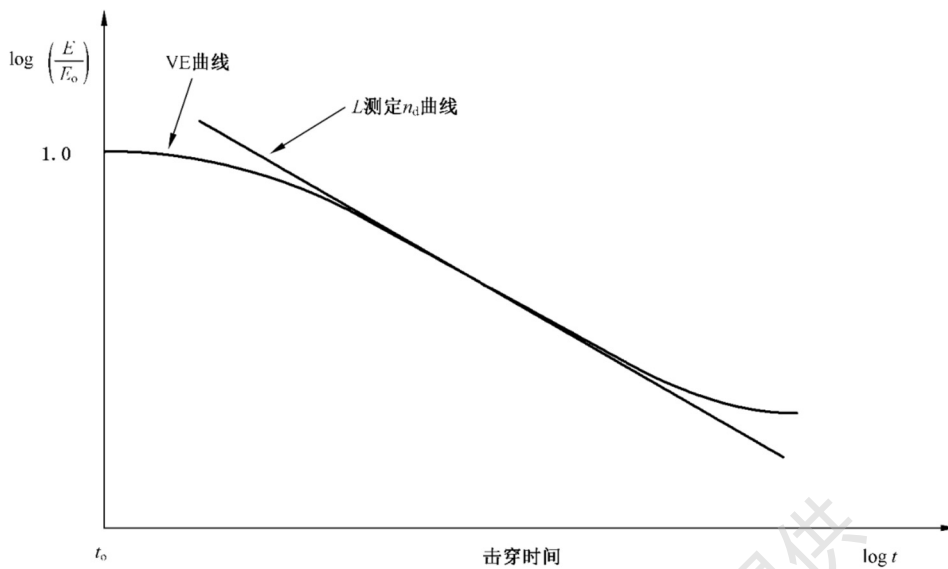


图2 在VE曲线上的任意一点确定非常数的 $VEC(n_d)$

4.7 电应力阈值(E_t)

如果VE曲线随着电应力下降变得趋于水平,这表明存在一个限值应力 E_t ,低于该值时,电老化可忽略不计,该值称为电应力阈值。通过适当持续时间的试验可监测VE曲线呈现水平的趋势。然而,试验并非总是在合理的时间内成功呈现这种趋势,某些绝缘材料或系统即使试验时间很长也不会出现电应力阈值。

4.8 电压耐久性关系

电压耐久性关系(VE关系)是电应力或电压作用下的寿命数学模型,即电气强度和介电击穿时间的关联公式,该式可通过VE曲线图表示。如果在双对数图中VE曲线为直线,则该式为式(1):

$$L = cE^{-n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

L ——介电击穿时间或者失效时间或者寿命;

E ——电应力;

c 和 n ——取决于温度和其他环境条件的常数,其中 c 是反幂函数模型常数, n 是符合电压耐久性系数的反幂函数模型应力指数。

式(1)为反幂函数模型,即电压—寿命模型,通常用于处理固体绝缘材料电压耐久性数据。在这种情况下 VEC 为 n 且为常数。当两个恒定电压应力下的介电击穿时间数据可用时,则可以采用该模型并按照式(2)估算 n 值。

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{-n} \quad \dots\dots\dots (2)$$

如果VE试验数据在双对数坐标中没有形成一条直线,则运用反幂函数模型是不正确的;如果曲线靠近电应力阈值 E_t ,宜使用其他模型计算。如式(3)所示:

$$L = c'(E - E_t)^{-n} \quad \dots\dots\dots (3)$$

如果 E_t 趋于0,式(3)为反幂函数模型,当短期击穿和中期击穿数据在双对数坐标系中拟合成一条直线时,也可使用式(4)。

$$L = \frac{k \exp(-hE)}{E - E_t} \dots\dots\dots (4)$$

此模型源自简单的指数模型,当 $E > E_t$ 时,在半对数坐标系中近似于一条直线;当 E 接近 E_t 时,介电击穿时间将会趋于无穷大。在式(3)和式(4)中,常数 c' 、 n 、 k 、 h 和 E_t 取决于温度和其他环境条件。式(3)和式(4)能用来生成两个新的方程,解释任意两个点 (L_1, E_1) 和 (L_2, E_2) 之间的电压耐久性曲线的趋势,如式(5)和式(6):

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1 - E_t}{E_2 - E_t} \right)^{-n} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\exp\{-h(E_1 - E_2)\}}{(E_1 - E_t)/(E_2 - E_t)} \dots\dots\dots (6)$$

在双对数曲线图上对于具有直线或直线段的电压耐久性曲线的公式为式(1)和式(2),当在双对数或半对数坐标图上以近似于线性趋势趋于阈值时,公式为式(3)、式(4)、式(5)和式(6)。

通过取对数,反幂函数模型变为式(7):

$$\ln(L) = \ln(c) - n \ln(E) \dots\dots\dots (7)$$

在双对数坐标系中,式(7)为电压耐久性直线方程,其斜率为 $-1/n$ 。由于斜率的倒数等于 VEC,故 VEC 也能表示反幂函数模型的指数 n 。

5 试验方法

5.1 概述

本章描述了进行电压耐久性试验的不同方法,以及施加电压方式(恒压或随时间增加)、频率(工作频率或更高)和试验中断时间(对于完整寿命试验,所有试样的介电击穿时间)或某些试样的短时击穿时间(检查寿命试验)的差异。

通常为进行对比,不管上述参数如何选择,试验使用老化单元或试样应相同。但对于施加电压频率的选择,应使介电损耗或局部放电所产生的热量而引起温度上升不应超过 3 K。

在测试材料时,施加到老化单元或被测试样的电场宜是均匀的,这可以通过边缘圆滑、表面平坦的电极来实现。试样应超出电极边缘适当的距离,以避免试样表面发生闪络或局部放电。如果预先试验表明试样超出电极边缘的距离,不足以避免产生局部放电和闪络,这时应将电极嵌入具有与试验材料接近或更高的介电常数的介质中。

试样的形状和加工工艺取决于试验目的。以研究为目的的试验,已经进行了以空穴尺寸和形状为目的的内部降解研究,但这不属于本标准的讨论范围。评定与比较外部放电造成的材料降解可参考 IEC 60343。

对于绝缘系统,应充分考虑其实际运行状况并由使用方确定试验方法。

5.2 恒定应力试验

5.2.1 常规 VE 试验

在恒定电应力试验中,试验期间施加在试样上的电压幅值保持不变。通常所选择的电压幅值使试样介电击穿的平均时间在几十到几千小时之间。特别是在低电压下,某些试样的介电击穿时间太长,等到所有试样都击穿是不实际的。在这种情况下,在大部分试样发生击穿后,停止试验,采用截尾数据处理方法(见 IEC 62539)处理试验数据。

通常,选择三个或者四个不同电压或电气强度进行试验。提供三个或四个数据绘制 VE 曲线。常常四个数据点也不足以确定曲线的斜率,但超过四个电压进行试验来绘制 VE 曲线是不经济的。

数据与直线的拟合可以通过具体的要求进行回归分析来建立(见 IEC 62539)。如果拟合结果合适,相关系数 R^2 为 0.90 或更高,则 VE 曲线可拟合为一条直线,直线斜率的负倒数为 VEC;反之,相关系数 R^2 低于 0.90,将 VE 拟合成直线不合适。

对于任何试验电压,与不同概率函数相拟合的介电击穿时间都可以测试。如果数据符合威布尔分布,试验数据呈现为直线(按威布尔坐标),直线的斜率为分布形状参数 β ,参见附录 A。在不同电压下以相同方式进行的每个试验可以核查常数 β 。

5.2.2 诊断试验

在需要进行诊断试验时,在试验期间监测如 $\tan\delta$ 或局部放电。当在不同电压下获得的 $\tan\delta$ 或局部放电结果对时间的曲线可做比较时,可建立相似的电压耐久性曲线,这有助于了解老化行为,并且可以预测其他试样电压耐久性曲线的趋势。

为评价试样的老化状态,对在一定老化时间后不失效的试样要进行短时电气强度测试。因此短时电气强度可作为一个测试由电气强度造成的老化程度的诊断量。

为深入研究老化过程,可借助化学和微观分析,其结果通常与宏观变量有关,例如短时电气强度、电导率、 $\tan\delta$ 等。

5.2.3 电气阈值检测

在长时间处于试验电压下,各试验点电压耐久性曲线有时表现出趋于水平的趋势,此外,许多电压耐久性试验研究报告表明在较低的电气强度下的失效时间比在较高电气强度下以趋势外推法所期望的失效时间要长,这些结果表明存在电气阈值,也为确定电应力阈值(E_c)提供试验数据。

通过提高频率进行的试验可以用于检查电压阈值,如 5.3 所述。另一种方法是在低电场下评定电压耐久性曲线趋势,如 5.6 所述。阈值应力受温度影响,通常温度升高阈值降低。当温度高于室温时,电压耐久性曲线通常向坐标系的左边移动,并且在相同的电气强度下介电击穿时间较短。电压耐久性试验通常在室温下进行。而在较高温度下进行的试验可提供有关老化过程的类型的信息以及 VE 曲线的形状信息,特别是有关阈值的存在及其取决于温度的信息。

5.3 高频试验

为缩短试验时间,可提高所施加的试验电压的频率。可通过试验频率(f_h)下的介电击穿时间 L_h ,推导出工频频率(f)下的介电击穿时间 L_f ,如式(8)所示:

$$L_f = L_h \frac{f_h}{f} \dots\dots\dots (8)$$

但式(8)的有效性没有被证明,特别是对于测试频率高于工频频率(f)10 倍及以上时。有时,加速老化与频率比的幂数成正比,该幂数也取决于温度、环境条件和老化机理类型。因为介电常数和 $\tan\delta$ 受频率和温度影响,因此与频率、介电常数和 $\tan\delta$ 成正比的介质发热量会影响介质电穿时间。此外,微小间隙的局部放电或材料内部和/或试样表面的缺陷在不同的频率下有不同的影响。因此,注意谨慎解释加速频率试验。

在低应力下的高频率试验可推断是否存在电应力阈值。如果工频下试验结果显示可能存在阈值,则应在尽可能接近该阈值的电压下进行高频试验。如果该电压下的击穿时间比 VE 曲线在较高电压下根据式(3)~式(6)所推断的预期的击穿时间长得多,可以确定存在电应力阈值,可以通过寿命曲线拟合出公式对其进行估值。

5.4 递增应力试验

在递增应力试验中,施加在每个试样上的应力幅值随时间的增加而增加直到失效。所有试样的应

力上升速率应相同,但不同样品的应力递增速率应改变,以便绘制递增电场下 VE 曲线(即收集样本),见图 3。

在本试验中,所有试样要失效,则可获得大量的数据信息,对数据的统计处理特别有用。如果与每个试样有关的数据符合威布尔分布,则相应的点在威布尔坐标纸上就拟合成一条直线,直线的斜率为威布尔分布的形状参数 γ (参见 A.2 和 A.3)。注意如果对不同的电压递增速率, γ 相同,VEC 可以从 γ 和 β 比值推导出来(参见 A.4)。因此,在材料和系统的电压耐久性试验中,在试验电压范围内期望有恒定的 VEC。为了在开始恒定应力试验前确定 γ ,宜采用递增应力试验。理论上可以推导出 VEC,可对 VEC 值和试验的合适持续时间进行核验。

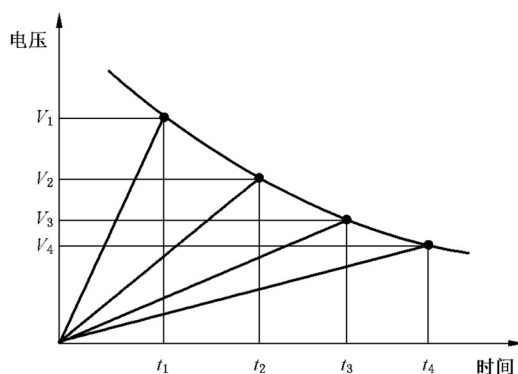


图 3 递增应力下的电压耐久性曲线

对于报告不同尺寸的试样(如试样表面积和体积)的试验结果,对 γ 值的认知非常重要。在相同的电压应力下,介电击穿概率随试样尺寸的增大而增加。例如对给定介电击穿概率的试样,为了查阅已经获得不同尺寸的试样数据,了解概率、应力和尺寸之间的关系是十分必要的。在威布尔分布有效的情况下,不同尺寸的两个元件 1 和元件 2 在对应于相同介电击穿概率下的 E_1 和 E_2 的比值,如式(9)所示:

$$\frac{E_1}{E_2} = R^{1/\gamma} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

R ——尺寸比,即元件 1 尺寸与元件 2 尺寸的比值(面积)(参见 A.2)。

递增应力试验的数据通常比恒定应力试验的数据分散性小。如果电压耐久性曲线在双对数坐标图中是直线,对于递增应力直线的斜率也是相同的。递增应力试验数据和恒定应力试验数据之间的关系通过式(10)给出:

$$t_p = t_c(n+1) \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

t_p, t_c ——相同应力下递增应力和恒定应力的介电击穿时间;

n ——VEC。

n 值通常在 8~15 之间, t_c 远小于 t_p ,递增应力下的介电击穿时间与恒定应力下较小的介电击穿时间具有对应关系,因此,递增应力试验只在短期评定电压耐久性系数中 useful。如果电压耐久性系数不是常数,从递增应力试验数据预测恒定应力下的介电击穿时间是不可能的。在任何情况下,从递增应力试验无法获得被试材料的长期运行状况信息,更不必说阈值了。

注:对于云母—环氧绝缘材料, n 通常在 9~12 之间。

5.5 确定电压耐久性曲线初始部分的预试验

预试验对于测定电压耐久性曲线的初始高压部分以及对 n 的初步估计是有用的。这些试验为后

续设计低压试验提供数据支持,包括:

- a) 递增应力试验或者类似于一个短时电气强度试验的分步电压试验,试验中的平均介电击穿电压为 E_0 ,失效不应是闪络,而应与在低电压和长时间情况下得到的介电击穿相似,在该试验中介电击穿时间可能长于建议值(参考 IEC 60243);
- b) 在短时电气强度 E_0 或者接近 E_0 的恒定应力试验,在试验过程中电压要升至 E_0 ,而且没有过电压;时间 t_0 从电压为 E_0 的时候开始测量。可以使用过零开关启动试验避免过电压,并使用计数器来计算发生击穿前交流电周期数;
- c) 可在略低于 E_0 作恒定应力试验。比如 $0.9E_0$ 、 $0.8E_0$ 。

根据式(10),递增应力下的介电击穿时间 t_p 与恒定应力下的介电击穿时间 t_0 的理论比值为 $(n+1)$,可由此计算电压耐久性曲线初始部分的估计值 n ,注意 (E_0, t_0) 点在电压耐久性曲线上。

5.6 推荐的试验方法

为了从电压耐久性全面描述绝缘材料或系统的特征,宜采用以下方法:

- a) 在 5.4 提到的高应力下预试验;
- b) 在较低应力下进行的恒定应力试验。在不同的应力下,足够的试验可以绘制 VE 曲线而得到对被测材料长期运行可靠性的预测。在任意情况下,至少需要三个测试电压。其他诊断试验也非常有助于判断材料或系统的电压耐久性。

在曲线显示出阈值应力的趋势时,可通过以下程序检查是否存在阈值,升高频率,在低于预期阈值应力约 5% 下进行试验,经数千小时后停止试验,取出部分试样进行化学物理分析和短时电气强度测量,如果短时击穿试验结果较未经耐久性试验的试样有明显差异,例如施加的电压低于阈值应力,则会发现电气强度降低。

6 电压耐久性评定

6.1 VEC 的重要性

通过分析常规电压耐久性曲线,清楚表明在同样的纵坐标 (E/E_0) 值以及其他参数相同时,VEC 越大介电击穿时间越长。换言之,当具有相同的 E_0 百分比,电应力施加于具有不同 VEC 的两种材料时,VEC 大的材料介电击穿时间较长。因此,VEC 是绝缘材料电压耐久性评定的重要参数。

因为 VE 曲线可能是非线性,因此 VEC 不是常数,说明测试 VEC 的电应力范围是重要的,如果没有证明 VEC 是常数,应给出其平均值。在曲线的情况下,4.6 中描述了非常数的系数 n_d ,测试 n_d 的电应力范围应提供补充说明。

值得注意, n_d 给出了曲线实际斜率的直接信息。因此,如“电应力从 E_0 降低到 $0.5E_0$, n_d 从 15 降到了 8”的说明是描述在此电应力范围内电压耐久性曲线的有效方法。

6.2 电应力阈值的重要性

如果待评材料或系统对绝缘设计提出了一个技术上有必要关注的电应力阈值(即电应力阈值不太低以致于它的实际重要性可以忽略),则该应力阈值成为 VE 试验中的一个有用因素。

6.3 数据分散性和精度要求

当施加于材料或系统的应力高于应力阈值,可用指定的方法(见 IEC 62539),通过统计处理来计算介电击穿的概率,为了获得有效的统计结果,要求满足以下条件:

- a) 测试试样应从大量待选试样中随机抽取(具有相同制造工艺的试样);

- b) 应测试试样厚度的一致性和均匀性；
- c) 每个试样应使用相同的试验单元。每次试验或从一次试验到另一次试验期间，温度和环境条件也应相同。

在多数情况下，概率非常低的介电击穿的 VE 曲线比平均值或中间值的 VE 曲线更有价值。除了核验线性趋势外，通常使用威布尔分布，处理所获得试验数据以计算低概率下介电击穿时间。

介电击穿时间的平均值或中值与低概率下的介电击穿时间的差异是被试材料固有介电击穿时间的分散函数。通过增加试样数量或每组试样击穿的数量可以得到合理可信的更精确的分散性估计和低概率介电击穿时间。

为了更直观地讨论试验精确性，应在电压耐久性曲线上标出每个由试验确定的点的置信区间。

F-检验可有效检查数据的偏离性，但需要跨越几十年的寿命数据。VEC 的数值越大，为了精确所需的数据量也就越多。

6.4 试验报告

为了完整地评定电气绝缘材料和系统的电压耐久特性，应绘制包括置信限在内的 VE 曲线图（优选不同百分比的曲线）。试验报告中应包含 VE 图，还应包括其他必要的数以便理解 VE 图并可证实图的可靠性。具体包括：

- 材料的唯一性标识；
- 试样的厚度和形状；
- 制备工艺；
- 试样的条件处理（如有）；
- 电极的形状和尺寸；
- 试验方法和设备；
- 各项电压耐久性试验的升压速率；
- 试验电压频率；
- 试验温度；
- 不同试验电压下被测试样数；
- 图中各点的分散性和置信区间；
- 其他应记录的信息。

如果试验结果以 VEC 形式表示，则电压耐久性曲线应满足线性要求。若不满足曲线现行要求，则应提供 n_d 的值以及相应的电应力范围。

还应说明统计分析类型，并在坐标纸上绘制出击穿时间概率。其他任何特殊形式的电压耐久性试验条件可通过专门文件来说明。

附 录 A
(资料性附录)
威布尔分布

A.1 介电击穿时间的威布尔分布

介电击穿时间的二参数威布尔分布通常如式(A.1)所示:

$$p(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$p(t)$ ——时间 t 介电击穿概率;

β ——恒定应力下介电击穿时间的威布尔分布形状参数;

α ——相对于 $p(t) = 1 - 1/e = 0.632$ 的时间。

通过两次取对数可得式(A.2):

$$\ln \ln[1/(1-P)] = \beta \ln(t/\alpha) \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

以 $\ln \ln[1/(1-P)]$ 对 $\ln(t)$ 作图即得斜率为 β 的直线。威布尔坐标纸是根据这样的坐标系刻度而特制的坐标纸。

A.2 介电击穿电场的威布尔分布

介电击穿电场的威布尔分布通常由式(A.3)表示:

$$P(E) = 1 - \exp(-mE^\gamma) \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

γ ——递增应力下介电击穿电场的威布尔分布形状参数;

m ——与尺寸比率 R 成比例(见 5.4)。

在威布尔坐标纸上,可以得到斜率为 γ 的直线。

如果不同尺寸的两个元件受到不同的应力 E_1 和 E_2 , 它们的介电击穿概率 P 相同, 则有式(A.4):

$$1 - P = \exp(-m_1 E_1^\gamma) = \exp(-m_2 E_2^\gamma) = \exp(-R m_1 E_2^\gamma) \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

根据式(A.4),可推导出 5.4 中的式(10)。

A.3 介电击穿电场的广义威布尔分布

介电击穿时间和电场的广义威布尔分布如式(A.5)表示:

$$P(t, E) = 1 - \exp(-Mt^\beta E^\gamma) \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

上式中 E 为常数时,式(A.5)可转化为式(A.1); t 为常数时,式(A.5)可转化为式(A.3)。对于递增应力($E = \rho t$),见式(A.6):

$$t^\beta E^\gamma = \rho^\gamma t^{(\beta+\gamma)} = \frac{E^{(\beta+\gamma)}}{\rho^\beta} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

因此,在递增电场试验中,威布尔坐标纸上概率对电场的直线的斜率为 $(\beta + \gamma)$,而不是 γ 。

然而,通常情况下 γ 远大于 β ,因此 $(\beta + \gamma)$ 和 γ 之间的差距小到可以忽略(γ 数量级为 10 或者更

大, β 在 0.5 和 2 之间)。

A.4 介电击穿时间的反幂函数模型

如果在不同的电应力下得到的试验数据适用相同的威布尔分布(形状参数 β 和 γ 为常数), 在恒定介质击穿概率为 \bar{P} 时的线性方程如式(A.7)所示:

$$1 - \bar{P} = \exp(-Mt_i^\beta E^\gamma) \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

t_i ——概率 \bar{P} 的介电击穿时间。

从式(A.7)中可以得到以下关系:

$$t_i^\beta E^\gamma = \text{常数}$$

因为 β 和 γ 为常数, 则得式(A.8):

$$t_i = C/E^{\gamma/\beta} \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式(A.8)为介电击穿时间的反幂函数模型, 设 $n = \gamma/\beta$

因此, 在给定范围内的威布尔分布(参见 IEC 61649)的有效性证明了在相同应力范围内介电击穿时间反幂函数模型的有效性, 反之亦然。

然而, 注意 β 和 γ 是统计参数, 而 n 不是。在某一给定的电场范围内常数 n 说明了在此范围内任何电场下的介质击穿机理是一致的。仅在这样的情况下, 递增应力才可以应用并用于转换为式(A.9):

$$t_p = t_c(n+1) \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

参 考 文 献

- [1] IEC 60243-1 Electric strength of insulating materials—Test methods—Part 1: Tests at power frequencies
 - [2] IEC 60243-2 Electric strength of insulating materials—Test methods—Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage
 - [3] IEC 60243-3 Electric strength of insulating materials—Test methods—Part 3: Additional requirements for 1.2/50 μ s impulse tests
 - [4] IEC 60343 Recommended test methods for determining the relative resistance of insulating materials to breakdown by surface discharges
 - [5] IEC 61649 Weibull analysis
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准

电气绝缘材料和系统
交流电压耐久性评定

GB/T 29311—2020/IEC 61251:2015

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2020年6月第一版

*

书号: 155066 · 1-65201

版权专有 侵权必究



GB/T 29311-2020