

工频和0.1 Hz余弦方波电压对 电缆耐压考核的等效性分析

魏力强¹, 苏金刚¹, 张鹏¹, 伊晓宇¹, 王伟², 梁聪²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 华北电力大学 高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要:工频与0.1 Hz余弦方波电压均可用于电缆耐压考核试验,但这两种电压考核的等效性尚不明确。为此,基于针板电极模型,对不同绝缘剩余厚度缺陷试样分别在工频和0.1 Hz余弦方波电压下进行击穿试验。统计分析不同电压下击穿时间的威布尔分布,观测并比较击穿通道的形貌特征,对工频和0.1 Hz余弦方波电压耐压考核强度差异的原因进行分析。结果表明:在针板电极模型条件下,0.1 Hz余弦方波电压下缺陷的击穿电压和击穿时间均大于工频电压,对电缆耐压考核的强度显著低于工频电压。0.1 Hz余弦方波电压试样击穿前未发现明显的烧灼碳化痕迹,累积效应不显著。余弦方波直流阶段注入电荷导致合成电场强度降低和累积效应不显著,这可能是导致0.1 Hz余弦方波电压对电缆耐压考核强度显著低于工频电压的原因。

关键词:交联聚乙烯;耐压;工频;余弦方波;击穿

中图分类号:TM855 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)03-0078-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.03.011

Equivalence Analysis on Withstand Voltage Assessment of Cable Under Power Frequency and 0.1 Hz Cosine Square Wave Voltage

WEI Liqiang¹, SU Jingang¹, ZHANG Peng¹, YI Xiaoyu¹, WANG Wei², LIANG Cong²

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Beijing Key Laboratory of High Voltage & Electromagnetic Compatibility, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Both power frequency and 0.1 Hz cosine square wave voltage can be used for withstand voltage assessment of cable, but the equivalence of assessments under two voltages is not clear. For this reason, on the basis of needle plate electrode model, breakdown tests under power frequency and 0.1 Hz cosine square wave voltage were carried out on the samples with different insulation residual thickness defects. The Weibull distribution of breakdown time under different voltages was statistically analyzed, the morphological characteristics of breakdown channel were observed and compared, and the reasons for the difference in the strength of assessment under power frequency and 0.1 Hz cosine square wave voltage withstand voltage were analyzed. The results show that under the condition of needle plate electrode model, the breakdown voltage and breakdown time of the defects under 0.1 Hz cosine square wave voltage are both greater than that under power frequency voltage, which indicates that the strength of cable withstand voltage assessment under 0.1 Hz cosine square wave voltage is significantly lower than that under power frequency voltage. Before the sample is broken down under 0.1 Hz cosine square wave voltage, there is no obvious traces of burning and carbonization, and the cumulative effect is not significant. The reduction of composite electric field intensity and insignificant cumulative effect caused by the charge injection of cosine square wave DC stage may be the reason that the 0.1 Hz cosine

收稿日期:2021-04-19 修回日期:2021-06-07

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(kj2019-059);河北省自然科学基金项目(E2021521003)

作者简介:魏力强(1985-),男(汉族),河北邢台人,高级工程师,主要研究方向为电力电缆寿命评估和诊断。

square wave voltage on the cable withstand voltage assessment is significantly lower than the power frequency voltage.

Key words: cross-linked polyethylene cable; withstand voltage; power frequency; cosine square wave voltage; breakdown

0 引言

交联聚乙烯(XLPE)电缆绝大多数的击穿事故与电缆系统的主绝缘关系密切^[1]。耐压试验是考核电缆绝缘性能的基础试验,是电缆投运前必须进行的一项交接试验,可以发现绝缘内部较大的缺陷。

电缆耐压考核的电压主要包括交流耐压和0.1 Hz的超低频耐压。由于电缆容量大,采用交流耐压的功率需求高,设备体积庞大,现场实施困难,而0.1 Hz超低频耐压试验需求功率低,设备体积小,被广泛采用^[2-6]。超低频包括正弦波和余弦方波两种,其中余弦方波设备的功率需求低,极性转换波形接近50 Hz工频电压,是一种新型的试验电压波形。各种电压波形对电缆耐压考核的等效性一直被人们所关注^[7-10]。研究表明,0.1 Hz超低频余弦方波和正弦波电树枝缺陷的生长速率均达到7.8 mm/h以上,是工频电压下电树枝缺陷生长速率(1.7 mm/h)的4倍以上,超低频电压是暴露交联聚乙烯电缆缺陷更好的试验方法^[11]。K UCHIDA等^[12]通过对制作的多种电缆缺陷进行工频、直流电压、0.1 Hz超低频电压和1.7 kHz振荡波电压的耐压击穿试验,得出了不同缺陷在这3种电压下的击穿电压(峰值)与工频电压下的击穿电压(峰值)的等效系数雷达分布图。E GOCKENBACH等^[13]用0.1 Hz超低频、50 Hz工频、250 Hz串联谐振电压和振荡波电压对针板电极下无缺陷电缆试样、机械缺陷电缆试样和水树缺陷电缆试样进行了耐压试验,得出以50 Hz无缺陷电缆的击穿电压为基准的4种试验方法的相对击穿电压。罗俊华^[14]通过对分别含有人工模拟缺陷和实际运行缺陷的XLPE电缆进行工频、直流、振荡波和超低频电压的平行对比击穿试验,首次确定了其他3种试验方法与工频电压试验方法的等效系数以及各缺陷介质的击穿电压。

当前研究主要针对的是电压幅值的等效性,缺乏标准耐压试验电压下耐压时间等效性的研究,对试验结果的理论解释涉及也较少。为此,本研究基于针板电极模型,对不同绝缘剩余厚度缺陷试样分别开展工频和0.1 Hz余弦方波电压下的击穿试验,统计分析不同电压下击穿时间的威布尔分布,观测

并比较击穿通道的形貌特征,对工频和0.1 Hz余弦方波电压对电缆耐压考核的等效性进行分析。

1 试验

1.1 针板电极模型

针板电极模型是研究极不均匀电场放电的重要模型,但相关标准中没有给出具体规定。传统针板电极模型的针电极多数采用长针直接插入XLPE试样的方式。由于XLPE具有一定的硬度,插入的深度和角度都不易控制,尤其是插入的深度,其对电极电场分布的影响很大,导致针电极与板电极间的距离即绝缘剩余厚度控制不理想,针尖位置的电场分布一致性差,试验结果的分散性较大。为此,设计了一种绝缘剩余厚度可控的针板电极模型,整体结构如图1所示。

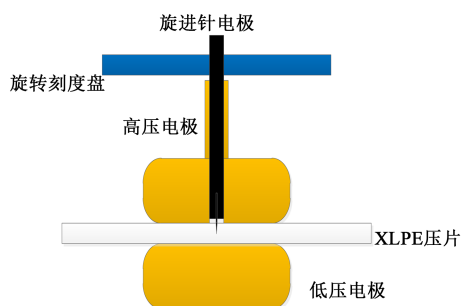


图1 针板电极模型

Fig.1 Needle plate electrode model

首先将尺寸为100 mm×100 mm×2 mm的XLPE压片试样用高压电极与低压电极压紧。电极均采用GB/T 1408.1—2016规定的规格为25 mm×25 mm、边缘倒角为3 mm的黄铜材料。然后在高压电极中置入旋进式的钨针电极,针电极头部直径为1 mm,曲率半径为20 μm,尾部为螺距为1 mm的螺杆用于旋进。最后通过带有刻度的旋转盘控制针电极的插入深度,每旋转36°,针电极深入0.1 mm。由于针尖较短,承受压力减小,其自身形变很小。旋进结构可以有效控制插入深度,绝缘剩余厚度可控性较高。通过控制针电极的插入深度,制备了绝缘剩余厚度分别为0.2、0.3、0.4、0.5 mm的模型。

试验时,将电极模型置入油箱中,以防止空气

中试验时 XLPE 试样可能发生沿面闪络造成影响。油箱中的绝缘油液面高于电极模型,顶部带有泄压阀,防止击穿瞬间压力突然增大可能引起的爆炸。

1.2 试验电压的施加方法

GB/T 29310—2012 规定^[15],对于 10 kV 电缆,采用 60 min 进行考核时,可采用 $2U_0$ 的工频电压,也可使用 $2.5U_0$ 的 0.1 Hz 余弦方波电压。为此,以 10 kV 电缆 U_0 为基准,对模型分别施加 $2U_0$ 工频电压和 $2.5U_0$ 0.1 Hz 余弦方波电压,记录其击穿时间并进行统计。

1.3 击穿时间的统计

对于固态绝缘电击穿试验数据分布最常见的是威布尔(Weibull)分布,它具有广泛的应用性,并且对于最薄弱点出现故障的极值分布类型具有很重要的价值。本研究采用两参数 Weibull 分布对击穿试验数据进行处理。两参数 Weibull 分布密度函数表达式为式(1)。

$$F(t, \alpha, \beta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

对式(1)作对数变换可得式(2)。

$$\ln\left(\frac{1}{\ln(1 - F(t))}\right) = \beta \ln\left(\frac{t}{\alpha}\right) \quad (2)$$

式(1)~(2)中: t 表示可测变量,即击穿时间; $F(t)$ 表示在击穿时间 t 时的失效概率; α 表示尺度参数,指失效概率为0.632时的击穿时间; β 表示形状参数,理论上为式(2)的斜率,表示试验数据的分散性,其值越大,击穿时间的变化范围越小。采用 White 方法计算 α 和 β 的数值^[16]。

1.4 击穿通道形貌的观测

击穿通道形貌是分析击穿过程的重要辅助手段,采用切片机配合显微镜进行观测。针尖缺陷 XLPE 压片被击穿后会留下贯通两极的击穿通道,切片机的作用是对击穿通道进行纵向剖切,其精度为 $1 \mu\text{m}$,可以对 XLPE 压片击穿通道进行完整的剖切,以便显微镜进行观察分析。显微镜的作用是对 XLPE 压片击穿通道的表面和纵向剖切通道进行观察,试验中采用的放大倍数为 20 倍。

2 结果与分析

2.1 工频电压作用下击穿时间的威布尔分布

工频电压下,不同绝缘剩余厚度试样的击穿时间和概率的威布尔分布如图 2 所示,据此计算的 α 尺度参数和 β 形状参数如表 1 所示。

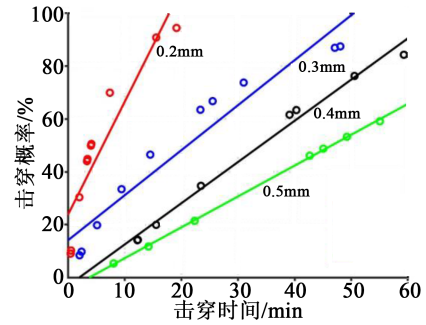


图2 工频电压下击穿时间的威布尔分布

Fig.2 Weibull distribution of breakdown time under power frequency voltage

表1 工频击穿试验的尺度参数和形状参数

Tab.1 Scale parameters and shape parameters of power frequency breakdown test

绝缘剩余厚度/mm	α/min	β
0.5	59.48	1.45
0.4	40.24	1.58
0.3	23.23	1.00
0.2	6.07	0.92

从表 1 可以看出,随着绝缘剩余厚度的增加, $2U_0$ 电压下的 α 尺度参数和 β 形状参数均逐步增大,即击穿时间增加,击穿时间的变化范围逐步减小。对于绝缘剩余厚度为 0.5 mm 的试样,其击穿时间约为 60 min,这意味着在 $2U_0$ 的工频耐压下,对于此种类型缺陷,能发现的缺陷剩余厚度最大为 0.5 mm。对于 0.2 mm 绝缘剩余厚度的缺陷,工频电压仅需 6 min 即可完成击穿。

2.2 余弦方波电压作用下击穿时间的威布尔分布

余弦方波电压下,不同绝缘剩余厚度试样的击穿时间和概率的威布尔分布如图 3 所示。由于 0.3、0.4、0.5 mm 绝缘剩余厚度试样在 $2.5U_0$ 电压作用下,最长加压时间为 3 h 条件下均未发生击穿,因此仅给出了 0.2 mm 绝缘剩余厚度试样的击穿数据统计。据此计算的 α 尺度参数和 β 形状参数如表 2 所示。从表 2 可以看出,对于 0.2 mm 的绝缘剩余厚度试样,其击穿时间约为 349 min,远长于工频电压作用下约 6 min 的击穿时间。这意味着在 $2.5U_0$ 的耐压下,对于此种类型缺陷,在 60 min 的规定耐压时间下是无法发现的。0.1 Hz 余弦方波电压对电缆耐压考核强度显著低于工频电压。

2.3 击穿通道的形貌特征对比分析

工频电压和 0.1 Hz 余弦方波电压下,0.2 mm 剩余绝缘厚度试样击穿通道的形貌对比如图 4 所示。

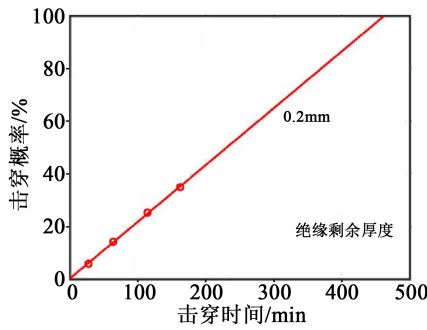


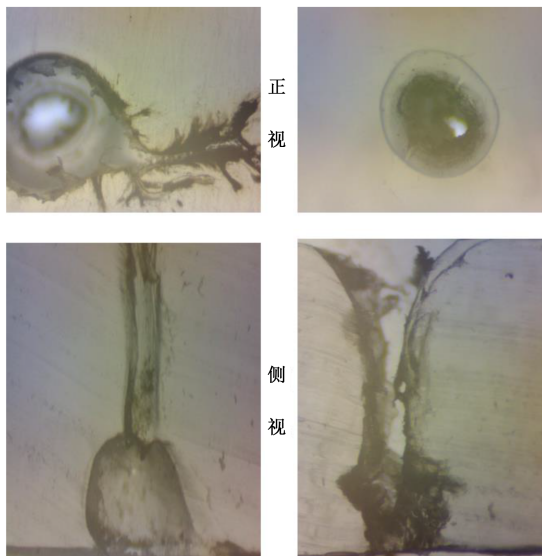
图3 余弦方波电压下击穿时间的威布尔分布

Fig.3 Weibull distribution of breakdown time under cosine square wave voltage

表2 0.1 Hz余弦方波击穿试验的尺度参数和形状参数

Tab.2 Scale parameters and shape parameters of 0.1 Hz cosine square wave breakdown test

绝缘剩余厚度/mm	α /min	β
0.2	348.62	1.11



(a)工频 (b)余弦方波

图4 击穿通道的形貌对比

Fig.4 The morphology comparison of breakdown channel

从图4可以看出,工频电压下的击穿通道直径大于余弦方波电压,击穿通道较为光滑,击穿通道低压电极侧有明显变粗的现象,这一现象也存在于其他绝缘剩余厚度的试样中。而0.1 Hz余弦方波电压下的击穿通道则没有这一现象,击穿通道较为崎岖,但较为均匀。这说明工频电压下击穿瞬间的能量注入较为充分,击穿过程XLPE材料气化充分,形成较直且平坦的击穿通道,而0.1 Hz余弦方波电压击穿时能量的注入则明显偏小,气化过程不充分,

使得击穿通道较细且比较崎岖。

此外,工频电压下XLPE试样低压电极侧具有明显的烧灼痕迹,这些痕迹是在击穿前出现的,而0.1 Hz余弦方波电压试样仅发现部分凹凸不平,并未发现明显的烧灼碳化痕迹。这说明工频电压对绝缘的危害具有累积性,而0.1 Hz余弦方波电压的累积效应不显著。这可能是0.1 Hz余弦方波电压对电缆耐压考核强度显著低于工频电压的原因之一。

2.4 余弦方波电压作用下的击穿时刻

通过对余弦方波击穿电压波形的统计发现,绝大多数击穿发生在电压的极性变换阶段,也就是余弦方波的上升沿或下降沿位置,典型击穿电压波形如图5所示。这种现象可能的原因在于,缺陷在上一极性电压的作用下注入了一定的空间电荷,在极性变换阶段,缺陷上的电压发生反转,与上一极性电压作用下注入的空间电荷形成电场叠加,增大了缺陷中的实际电场,因而容易导致击穿。

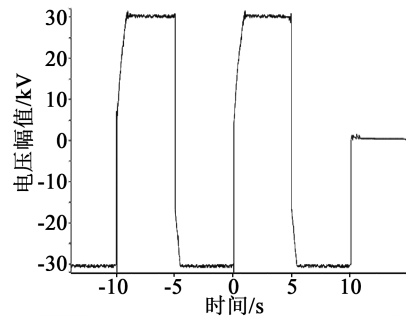


图5 余弦方波电压下的击穿波形

Fig.5 Waveform of breakdown voltage under cosine square wave voltage

3 讨论

3.1 试验现象的原因分析

通过试验可知,在针板电极模型条件下,0.1 Hz余弦方波电压对电缆耐压考核强度显著低于工频电压。工频电压在 $2U_0$ 电压、60 min的击穿时限下,可以发现0.5 mm绝缘剩余厚度的缺陷,而0.1 Hz余弦方波电压在 $2.5U_0$ 电压作用下,仅能发现0.2 mm绝缘剩余厚度的缺陷,并且需要349 min。前已述及,0.1 Hz余弦方波电压的累积效应不显著可能是0.1 Hz余弦方波电压对电缆耐压考核强度显著低于工频电压的原因之一。而余弦方波直流阶段注入的空间电荷导致的合成电场强度降低可能是导致上述现象的另一个原因。

以0.5 mm剩余绝缘厚度为例,通过仿真计算可

知,在 $2.5U_0$ 余弦电压的作用下,其针尖位置的电场强度超过 300 kV/mm ,远高于XLPE材料的空间电荷注入场强(30 kV/mm)^[17]。空间电荷的注入受电场强度和作用时间的共同影响^[18]。由于缺陷位置的场强很高,尽管注入的时间仅有 5 s ,也会有较为可观的空间电荷注入,这会显著降低缺陷位置的实际场强。

但在极性变换阶段,缺陷上的电压发生反转,与上一极性电压作用下注入的空间电荷形成电场叠加,则增大了缺陷中的实际电场^[19]。上述两个过程使余弦方波电压作用下缺陷位置的合成场强如图6所示。其特点为在直流电压阶段,合成场强低于不考虑空间电荷注入时的原始场强,而在极性变化阶段,合成场强则高于不考虑空间电荷注入时的原始场强,对绝缘的考核主要体现在极性变换阶段,这与余弦方波击穿时刻主要在极性变换阶段的试验现象是一致的。

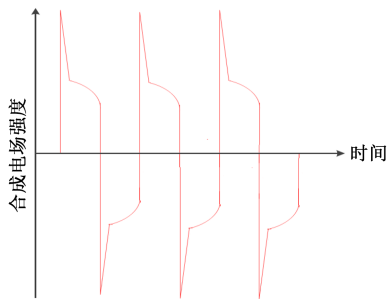


图6 余弦方波电压下缺陷处的合成场强示意图

Fig.6 The resultant field strength at the defect under cosine square wave voltage

而对于工频电压,由于电压极性的变换时间在 ms 量级,空间电荷的注入效应不明显,合成场强变化不大,虽然 $2U_0$ 的电压低于余弦方波 $2.5U_0$ 的电压,但其对绝缘考核的强度更高,因而可以在更短的时间内完成击穿。

提高余弦方波的电压可以同时提升直流和极性变换阶段的实际作用场强,提高余弦方波的频率可以提升单位时间内极性变换的次数,提升实际作用场强,可以预见这两种方式会提升其对电缆耐压的考核强度。为验证推测的正确性,使用 0.5 Hz 的余弦方波在 $2.5U_0$ 电压下进行试验验证,结果如表3所示。从表3可以看出,提高频率,击穿时间大幅缩短到约 37 min ,形状参数 β 也有一定的提升。

3.2 试验结果对工程上的指导意义

当前规程中规定,对于 10 kV 电缆,采用 60 min

表3 0.5 Hz余弦方波击穿试验的尺度参数和形状参数

Tab.3 Scale parameters and shape parameters of 0.5 Hz cosine square wave breakdown test

绝缘剩余厚度/mm	α/min	β
0.2	37.10	1.21

进行考核时,可采用 $2U_0$ 的工频电压,也可使用 $2.5U_0$ 的 0.1 Hz 余弦方波电压。从试验结果来看, $2.5U_0$ 的 0.1 Hz 余弦方波电压 60 min 的耐压考核强度远低于 $2U_0$ 的工频电压 60 min 的耐压考核强度。应该适度提升余弦方波的电压、频率或考核时间,来提升其耐压考核强度。

4 结论

(1)在针板电极模型条件下, 0.1 Hz 余弦方波电压对电缆耐压考核的强度显著低于工频电压。 0.1 Hz 余弦方波电压试样在击穿前未发现明显的烧灼碳化痕迹,累积效应不显著。

(2)余弦方波直流阶段注入电荷导致的合成电场强度降低和累积效应不明显可能是导致 0.1 Hz 余弦方波电压对电缆耐压考核强度显著低于工频电压的重要原因。

参考文献:

- [1] 周远翔,赵健康,刘睿. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术,2014,40(9):2593-2612.
- [2] 柳淑艳,杨帆. 0.1Hz超低频正弦波耐压试验技术及应用[J]. 高电压技术,2004(S1):79-80.
- [3] 顾清,王亮. 电缆耐压试验方法及典型问题分析[J]. 电工技术,2013(6):14-15.
- [4] 张梁,吴仁宜. 苏州供电公司 0.1 Hz VLF(超低频)余弦方波电缆耐压试验技术应用[J]. 机电信息,2009(36):96-97.
- [5] 魏力强,贾伯岩,王伟,等. 余弦方波电压作用下不同水树长度缺陷XLPE材料的击穿特性[J]. 绝缘材料,2020,53(12):73-77.
- [6] 赵建刚,侯建设. 0.1Hz超低频试验在交联电缆中的应用[J]. 高电压技术,2004(S1):77-78.
- [7] 赵健康,欧阳本红. 高压电缆竣工试验变频耐压与工频耐压等效性研究[C]//第十三届全国工程电介质学术会议论文集. 西安:中国电工技术学会工程电介质专业委员会,2011.
- [8] 熊俊,张强,马国明,等. 大容量长距离交流XLPE电缆交接试验方法[J]. 高电压技术,2018,44(11):3727-3735.
- [9] 樊伟成,田立斌,谭康,等. XLPE电缆检测现场试验等效性研究概况[J]. 电气技术,2013(11):45-48.
- [10] 刘智谦,高震,郝建,等. 交流 500 kV 交联聚乙烯海缆绝缘材料的步进工频击穿特性及寿命模型[J]. 绝缘材料,2020,53(2):29-35.
- [11] 吴喜玉. 交联电缆交流耐压试验规程修订的技术探讨[J]. 贵州

- 电力技术,2015,18(6):26-30
- [12] UCHIDA K, KOBAYASHI S, KAWASHIMA T, et al. Study on detection for the defects of XLPE cable lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(2):663-668.
- [13] GOCKENBACH E, HAUSCHILD W. The selection of the frequency range for high-voltage on-site testing of extruded insulation cable systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000,16(6):11-16.
- [14] 罗俊华.XLPE电力电缆绝缘特性试验方法的研究[D].西安:西安交通大学,2003.
- [15] 全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会. 电气绝缘击穿数据统计分析导则:GB/T 29310—2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [16] 国家电网有限公司. 配电电缆线路试验规程:Q/GDW 11838—2018[S].北京:国家电网有限公司,2018.
- [17] 王伟,蒋达,董文妍,等. 电缆振荡波试验中直流充电速率对XLPE中空间电荷积聚的影响[J]. 高电压技术,2018,44(9):2881-2888.
- [18] 徐晓彬,刘爱静,乐彦杰,等. 直流预压对针板电极下XLPE中空间电荷及电树枝的影响[J]. 中国电力,2021,54(4):56-62,71.
- [19] 曹俊,周桂月,张洪亮,等. 连续极性反转电场下XLPE中空间电荷特性研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4325-4333.

版 权 声 明

凡是在本刊上刊登、并由本刊支付稿酬的作品,均视为该作者同意将作品的全部权利转让给本刊,且允许本刊以任何形式(包括但不限于纸质出版、网络出版、光盘等)使用、编辑、修改;本刊有权对作品再次使用,并可授权给第三方而无需另行支付稿酬。未经本刊书面许可,任何单位和个人都不得以任何形式(包括但不限于通过纸媒质、网络、光盘等介质转载、张贴、结集、出版)使用该作品。

《绝缘材料》编辑部