

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.022

高温硫化硅橡胶电晕加速老化试验参数研究

董平平¹, 杨 茹², 陈永明², 高丽娟³

(1. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电分公司, 江苏 宿迁 223800; 2. 国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司, 江苏 镇江 212000; 3. 国网河北省电力有限公司衡水供电分公司, 河北 衡水 053000)

摘要: 为得到合理的硅橡胶实验室电晕加速老化试验参数,文中通过构建气压湿度可调的硅橡胶电晕加速老化试验平台进行电晕老化试验,并对不同气压、湿度和老化时间的试样做扫描电镜分析(SEM)和沿面闪络试验。研究表明:气压100 kPa、相对湿度90%时的起晕电压最高,为了保证各工况下均能发生稳定的电晕放电且又不会改变放电形式,最终将外施电压确定为10 kV。同时,为保证各种工况下老化到 t_{end} 时均能发生严重的老化,选择放电功率最低的工况气压100 kPa、相对湿度90%,并根据SEM试验结果确定了代表材料老化从量变到质变的典型阶段,老化取样时刻为100 h(孔洞)、400 h(裂纹)和800 h(絮状覆盖,湿闪电压下降50%),老化结束时间为800 h。

关键词: 硅橡胶; 电晕老化; 试验参数; 沿面闪络; SEM

Study on Corona Accelerated Aging Test Parameters of High Temperature Vulcanized Silicone Rubber

DONG Pingping¹, YANG Ru², CHEN Yongming², GAO Lijuan³

(1. Suqian Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Supply Co., Ltd., Jiangsu Suqian 223800, China; 2. Zhenjiang Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Supply Co., Ltd., Jiangsu Zhenjiang 212000, China; 3. Hengshui Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Hebei Hengshui 053000, China)

Abstract: The corona aging test of silicone rubber corona accelerated aging test platform with adjustable air pressure and humidity is carried out in this paper for reasonable corona accelerated aging test parameters of silicone rubber in the laboratory. The scanning electron microscopy (SEM) and surface flashover tests are carried out on samples with different air pressure, humidity and aging time. The results show that the corona voltage is highest at pressure of 100 kPa and relative humidity of 90%. In order to ensure that corona discharge can occur in all operating conditions and discharge form is not changed, the applied voltage is determined to be 10 kV. Meanwhile, the operating conditions (100 kPa, 90%) of the lowest discharge power is selected to ensure serious aging under various operating conditions. The representative stage of the aging from quantitative to qualitative is determined according to SEM test, and the sampling aging times are 100 h (hole), 400 h (crack) and 800 h (flocculation, flashover voltage drop 50%), and the aging end time is 800 h.

Key words: silicon rubber; corona aging; test parameters; flashover; SEM

0 引言

与瓷和玻璃绝缘子相比,硅橡胶复合绝缘子因其憎水性强和耐污闪能力强等优点,近年来已广泛应用于国内外输电线路^[1-5]。作为有机绝缘材料,复合绝缘子伞裙材料受到外界恶劣自然因素的影响,

不可避免的会发生老化,其中电晕放电在绝缘材料表面发生的概率较高^[6-7]。长时间的电晕放电将导致硅橡胶伞裙材料表面发生粉化、裂化等老化现象,导致复合绝缘子憎水性丧失,危及电力系统的安全稳定运行^[8-10]。因此,复合绝缘子电晕老化问题一直是研究人员普遍关注的问题。

收稿日期:2018-08-04; 修回日期:2018-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51207055);河北自然科学基金项目(E2013502213)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51207055), Natural Science Foundation of Hebei Province (E2013502213).

目前,国内外针对电晕老化对硅橡胶的影响研究有很多,文[11-12]研究了电压、湿度、时间对硅橡胶材料老化特性变化的影响,其中只对试验电压参数设置给出了确定方法;文[13]在美国 ASTM D2275-01 标准的基础上,开展了固体绝缘材料耐电晕老化测试系统的研制,设计了一套电晕条件(包括电晕强度、湿度以及温度等参数)可控的固体绝缘材料耐电晕老化测试系统的硬件平台。文[14]对 HTV 进行了电晕加速老化试验,研究结果表明,在 10 kV 电压下,针电极的曲率半径为 1.5 mm、针板间距为 6 mm 左右的电晕老化现象比较明显,且随着时间增加,其老化速率会越来越慢,其中电晕老化时间定为 100、300、500、1 000 h。研究者往往通过实验室人工电晕加速试验来考察外绝缘材料的耐电晕性能,而电晕加速老化试验条件和参数设置的合理与否,将直接影响到对硅橡胶在该条件下的电晕老化机理认识。现有的电晕加速老化试验大多在标准气压条件下进行,未能全面考虑不同气压、湿度对材料耐电晕性的影响^[15-17]。同时,已有研究中较少涉及对试验参数选择依据的探讨。因此,文中对不同气压、湿度下的电晕加速老化试验参数进行研究,通过仿真计算得到放电较为均匀,放电范围较大的电极布置形式;通过不同气压和湿度下的电晕放电试验,得到合适的外施电压。最后通过对不同老化时刻的试样做 SEM 分析和沿面闪络试验得出老化结束时间和老化取样时刻。文中为研究不同气压湿度下硅橡胶电晕加速老化试验参数的选择提供参考。

1 试验装置和方法

1.1 试样制备

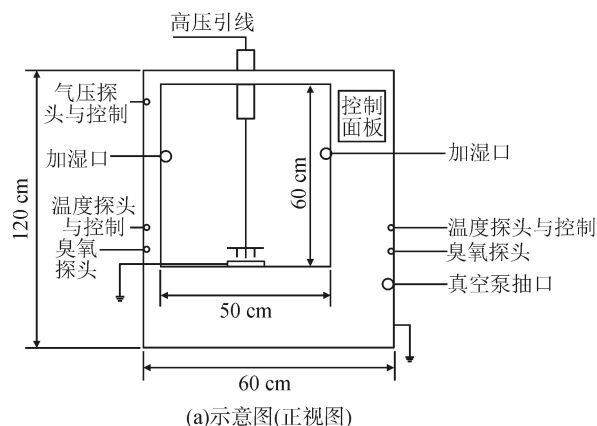
试样采用高温硫化硅橡胶材料。由保定电力修造厂制备,其配方按传统工艺配制。制备 HTV 硅橡胶试样若干,对应于针—板电极的尺寸为 45 mm×45 mm×3 mm(长×宽×厚)。将试样置于无水乙醇中清洗表面,然后用去离子水(或蒸馏水)冲洗,干燥后置于防尘容器内,在实验室标准环境下保存 24 h 后备用。电晕老化试验后,使用专门切割钻头对老化后的硅橡胶试样进行切割,得到用于沿面闪络试验的直径为 20 mm,厚 3 mm 的圆形试样。

1.2 硅橡胶电晕加速老化试验平台构建

由于该课题的研究对象为复合绝缘子,结合复合绝缘子的运行特点及运行环境条件,研制了相应的复合绝缘子用硅橡胶材料耐电晕老化试验平台。

1.2.1 环境控制系统

结合气象信息,确定了如下老化环境条件:温度为 20 ℃,气压范围为 40~100 kPa,相对湿度变化范围为 15%~95%。采用超声波加湿和复叠制冷方式实现对湿度的调节;采用分子泵和真空泵实现对气压的调节。难点在于气压和湿度的调节配合,若湿度太大,利用真空泵降压过程会有水分进入真空泵,损坏真空泵。为此,利用补集器低温抓捕水蒸气的方式,以解决湿度与气压的组合问题。同时,箱体内部安装了多组湿度、臭氧探头,采用智能仪表实时监测相关参数的变化。试验箱整体布置图见图 1。



(b)实物图

图1 多功能试验箱

Fig. 1 Test chamber schematic

1.2.2 电晕放电系统

该电晕放电系统采用了多针—板放电模型,通过前期 COMSOL 电场仿真计算和试验测试最终确定了如下电极布置方式,见图 2:选用 3 支不锈钢钢针,半径 $r=0.5$ mm,针—针间距 $d=6$ mm,针—板间距为 $H=4$ mm。

1.3 沿面闪络试验

文中闪络电极采用指形电极,其可使电极间电场尽可能均匀^[18],电极示意图见图 3。电极半径为 8 mm,电极间距离为 8~10 mm 可调。沿面闪络试验

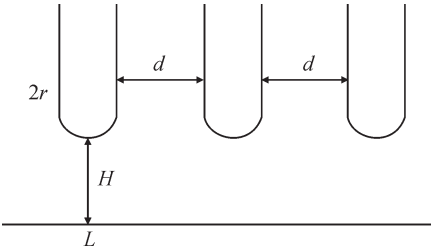


图2 针—板电极布置示意图

Fig. 2 The needle-plate electrode arrangement diagram
是在相对湿度为90%,温度为28℃的条件下进行,将制备好的试样放入指型电极中央,对其施加电压,施加电压的梯度为1 kV。在施加电压过程中对沿面湿闪电压进行测量。每片试样进行5次湿闪试验,每次试验间隔5 min,闪络电压取5次的平均值。

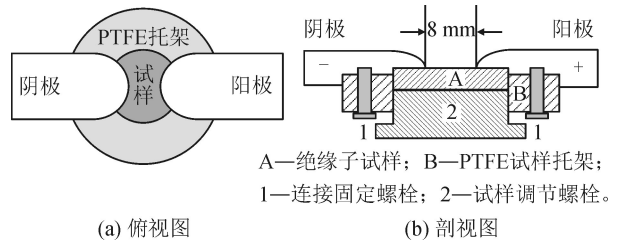


图3 指形电极示意图

Fig. 3 Finger electrodes schematic

1.4 试验流程

首先,通过仿真确定针板电极布置形式,然后取制备好的试样在不同气压、湿度下进行电晕放电试验,测得了不同条件下的电晕起始电压,以确定交流电晕电压参数大小,然后选择放电功率最低的工况做电晕老化试验,在不同的老化时刻取出试样进行湿闪电压和SEM测试,通过分析,最终得到老化结束时间 t_{end} 及老化取样间隔。

2 试验参数确定

2.1 外施电压的确定

为了保证放电的稳定、均匀性,同时获得较大面积的放电范围,1.2.2部分中确定了电极的布置形式(针间距及针—板间距)。因此,影响硅橡胶材料电晕放电强度的主要因素为外施电压和外界环境条件。在不同的气压、湿度下进行放电试验,测得了不同条件下的电晕起始电压,列于表1中。从表1可见,在气压45 kPa、相对湿度25%时的起晕电压最低,气压100 kPa、相对湿度90%时的起晕电压最高,为5.3 kV。为了保证各工况下均能发生电晕放电,外加电压应高于5.3 kV。外加电压越高,老化试验的进程越快,老化效率也随之提高。

表1 不同气压、湿度下的放电参数

Table 1 Discharge parameters under different pressure and humidity

工况	100 kPa			80 kPa			60 kPa			45 kPa		
	25%	55%	90%	25%	55%	90%	25%	55%	90%	25%	55%	90%
起晕电压 U/kV	4.0	4.8	5.3	3.9	4.6	4.8	3.7	3.9	4.3	2.4	3.2	4.2

文中放电试验在夜晚进行,不同外施电压下的电晕放电图见图4。电晕放电波形的采集通过下电极串联无感电阻,并利用示波器测量无感电阻两端电压取得。电晕泄漏电流波形见图5。

变压器油纸绝缘的介电响应特性研究——加速热老化的介电谱

当外施电晕升高为5.5 kV左右时,从示波器观察到的放电波形出现有规律的重复电流脉冲,此时肉眼观察不到电晕光亮;当外施电压升高为10 kV左右时,此时肉眼可以观察到微弱的蓝紫色电晕层并伴有“吡吡”声,见图4(b),示波器观察到的放电波形出现幅值较大的重复电流脉冲,且脉冲位置基本不变,表明放电比较稳定,见图5(b);当外施电压继续升高时,出现幅值大的多的不规则的电流脉冲,见图5(c),放电转为流注形式的电晕放电或刷状放电,从图4(c)可以看出,由于电压过大而导致上电极板出现明显光亮,此时放电不稳定,当长时间的电

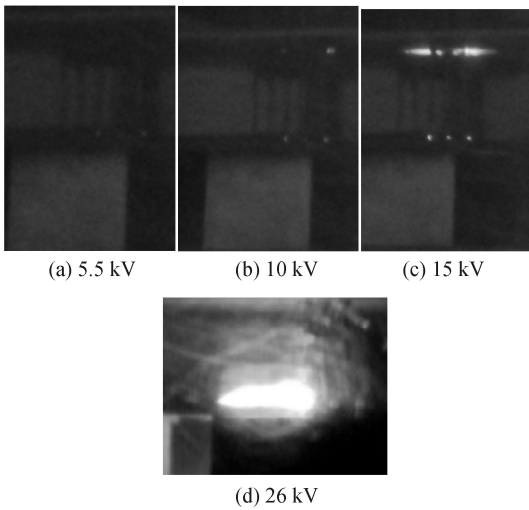


图4 不同外施电压下的电晕放电图

Fig. 4 Corona discharge under different applied voltage

晕老化容易导致整个间隙的火花击穿,影响电晕放电的效率。当外施电压进一步升高时,针—板间隙

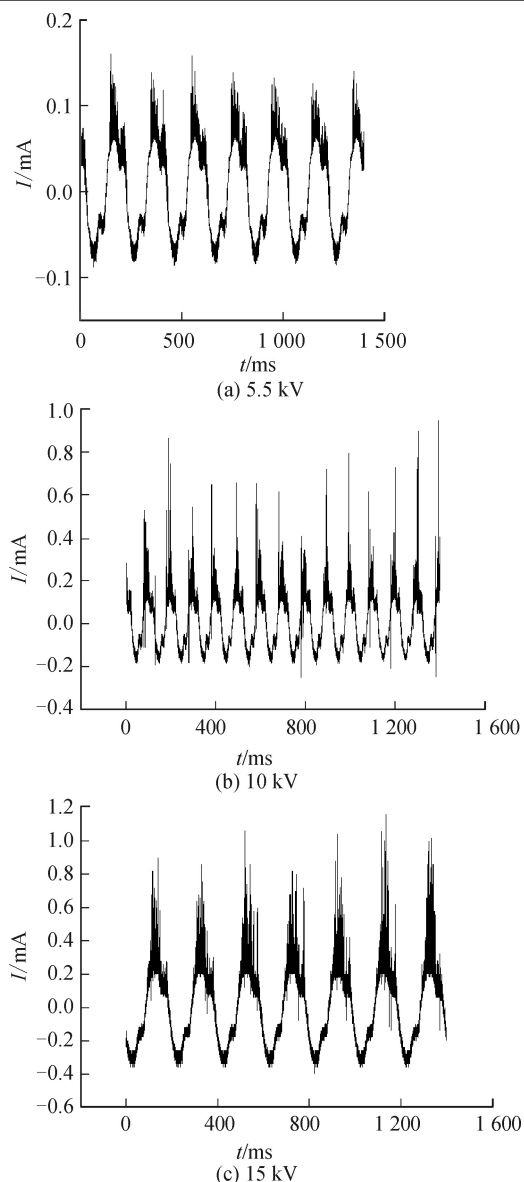


图5 不同外施电压下的电晕泄漏电流波形

Fig. 5 Corona leakage current waveforms under different applied voltages

出现电弧放电,整个间隙被击穿并伴有明亮的放电电弧和巨大的声响,见图4(d)。因此,文中将外施电压定为10 kV,既能保证其为电晕形式的放电,又提高了放电效率。

2.2 老化结束时间及取样时刻的确定

从表1可以看出,绝缘子试样在气压为45 kPa、相对湿度25%时这种工况下的起晕电压最低为2.4 kV,放电发生更容易,此时的老化周期最短,为保证试样在不同工况下老化到 t_{end} 时均能发生严重的老化,同时也便于再现老化的典型阶段,因此,选择放电功率最低的工况(100 kPa、相对湿度90%)作为确定老化结束时间 t_{end} 及老化过程的参考。

为了确定 t_{end} 及取样时刻,设计了如下试验:保持试验箱体内气压为100 kPa,相对湿度为90%,施

加10 kV电压,在不同的老化时刻取出试样进行了宏观和微观老化特性测试。若试样的湿闪电压下降50%,则对应的老化时间为 t_{end} 。试样在典型阶段的表面照片、闪络电压和表面微观形貌变化见图6-8。实际上,通过观察窗发现,试样表面在电晕老化十多个小时后,其表面即出现黑色物质,之后逐渐向周围扩散。老化100 h时开始析出白色晶体,随着时间的增加,白色晶体逐渐向周围扩散成白色粉末状,覆盖在黑色物质上,当老化到800 h时,试样表面向外扩散的黑色晕圈清晰可见,而中间析出更多的白色晶体。沿面闪络试验是在相对湿度为90%,温度为28℃的条件下进行的,老化时间到800 h时,试样表面的湿闪电压约下降为新试样的50%,而老化直至400 h时,试样表面的闪络电压下降不明显,因此将800 h作为老化终结时间。从SEM结果中看到,新试样表面平整光滑,当经受电晕放电后,其表面出现了小孔洞,孔洞逐步扩展发展为狭长的裂纹,之后裂纹上面被絮状物质覆盖。根据上述结果可以得到,闪络电压这一宏观特性只有当老化至较为严重的程度时,才会发生较明显的变化,而表面形貌可以反映老化从量变到质变的过程。因此,将老化取样时间定为100 h(孔洞)、400 h(裂纹)和800 h(絮状覆盖,闪络电压显著下降)。

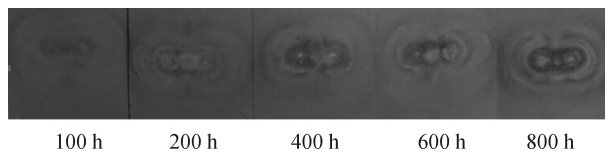


图6 试样老化不同阶段的表面图片

Fig. 6 Surface images of different aging stages of samples

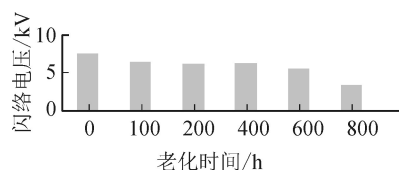


图7 电晕老化试样湿闪电压

Fig. 7 Wet flash voltage of corona aging sample

3 讨论

固体绝缘材料耐电晕加速老化试验是为了考核材料的耐电晕性能。电晕放电强度既会影响材料老化进度,又决定了放电的形式。因此,电晕放电强度是固体绝缘材料电晕加速老化试验的关键性参数,它与材料性质、外施电压、电极形式及布置、外界环境等均有关^[19-20]。为了保证放电的稳定、均匀性,同时获得较大面积的放电范围,文中对针

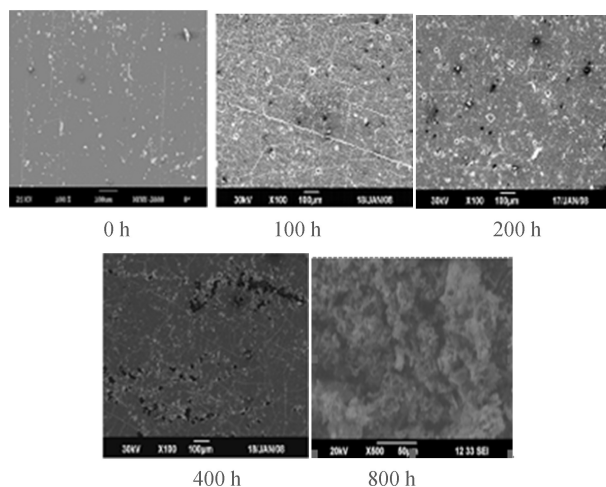


图8 试样表面的SEM结果

Fig. 8 SEM results of the sample surface

板电极进行仿真实验,最终确定的布置方式为针—针间距6 mm,针—板间距为4 mm。因此,影响硅橡胶材料电晕放电强度的主要因素为外施电压和外界环境条件。文中在不同的气压、湿度下进行放电试验,研究结果发现,在气压45 kPa、相对湿度25%时的起晕电压最低,这是因为低气压、低湿度下,空气密度和水分子密度小,放电通道中带电粒子密度大,因此,放电更容易发生,导致起晕电压低。相反在气压100 kPa、相对湿度90%时的起晕电压最高,为5.3 kV。为了保证各工况下均能发生电晕放电,外加电压应高于5.3 kV,随着外施电压的升高,电晕放电产生的“吡吡”声越来越明显,显然外加电压越高,老化试验的进程越快,老化效率也随之提高。但是外施电压不能过高,当外施电压为15 kV时,图4(c)所示外施电压导致上电极板出现放电,并且放电波形出现幅值很大的电流脉冲,放电形式转为流注性质的放电、转为流注形式的电晕放电或刷状放电^[21],使得放电很不稳定,此种放电形式经过长时间的加压,很可能导致空气击穿,使得放电不能正常进行,降低试验效率。而外施电压为10 kV的电晕放电形式,既保证电晕放电不会出现很多的电流脉冲,使放电稳定进行,又能保证放电形式为电晕放电。

为确定能够表征硅橡胶电晕老化进程中具有代表性的老化试样,需要再现材料老化从量变到质变的典型阶段。因此,除了电晕强度还需要选择合适的取样间隔,确定老化寿命终结时间等参数。图8可以看出,随着老化时间的增加,硅橡胶材料开始析出白色晶体和黑色物质,文[22]认为白色晶体为无机硅化合物,黑色物质为析出的游离碳。老化时间为200 h时,可见试样表面有小孔洞出现,这是因为电晕放电产生的带电粒子在撞击硅橡胶表面时

打断了硅橡胶中的化学键,使得其表面出现孔洞,随着时间的增加(400 h),空气中硅橡胶材料电晕放电时会形成一定量的硝酸,硝酸的腐蚀和带电粒子的轰击联合作用,使得小孔洞逐步扩展发展为狭长的裂纹,老化时间为800 h时,硅橡胶表面覆盖了大量絮状物,文[23-24]认为絮状物可能是由于无机填料白炭黑和氢氧化铝等颗粒外露,此时老化状态最严重,湿闪电压下降到50%,可以认为是老化结束时间 t_{end} 。通过以上分析可以发现,硅橡胶试样在随着老化时间的增加,试样表面形貌发生了从孔洞—裂纹—絮状物的变化,这也说明这3种状态正是硅橡胶材料老化从量变到质变的典型阶段,因此,可将老化取样时刻定为100 h(孔洞)、400 h(裂纹)和800 h(絮状覆盖,湿闪电压下降50%)。

4 结论

文中为研究高温硫化硅橡胶电晕加速老化试验参数的确定方法,得出以下结论:

1)通过不同气压和湿度下的电晕放电试验发现,气压100 kPa、相对湿度90%时的起晕电压最高为5.3 kV,为了保证各工况下均能发生电晕放电且又不会改变放电形式,最终将外施电压确定为10 kV。

2)通过沿面闪络电压试验和SEM分析发现,老化取样时刻100 h(孔洞)、400 h(裂纹)和800 h(絮状覆盖,湿闪电压下降50%)均能代表材料老化从量变到质变的典型阶段,当材料闪络电压下降50%时,此时老化特性严重下降,表面覆盖大量絮状物,可将此时定为老化结束时间 $t_{\text{end}}=800$ h。

3)闪络电压这一宏观特性只有当老化至较为严重的程度时,才会发生较明显的变化,而表面形貌可以反映老化从量变到质变的过程。

参考文献:

- [1] 关志成,刘瑛岩,周远翔,等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006:4-6.
GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yuanxiang, et al. Insulation of insulator and power transmission equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006:4-6.
- [2] 刘云鹏,石倩,梁英. 干燥环境下紫外辐射对硅橡胶老化性能的影响[J]. 高压电器,2015,51(4):129-132.
LIU Yunpeng, SHI Qian, LIANG Ying. Effect of UV radiation on aging performance of HTV-silicone rubber in dry conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 129-132.
- [3] 巢亚锋,王成,黄福勇,等. 中国输电线路复合绝缘子运行状况分析[J]. 高压电器,2015,51(8):119-124.

- CHAO Yafeng, WANG Cheng, HUANG Fuyong, et al. Assessment on operation state of composite insulators used on Chinese transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 119-124.
- [4] 申文伟, 宋伟, 王国利, 等. 复合绝缘子 HTV 硅橡胶材料老化特性的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 1-7.
- SHEN Wenwei, SONG Wei, WANG Guoli, et al. Influence of corona discharge on aging characteristics of HTV silicone rubber material[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 1-7.
- [5] 贺博, 万军, 金海云, 等. 复合绝缘子的老化特征分析[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 21-24.
- HE Bo, WAN Jun, JIN Haiyun, et al. Aging character analysis of composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 21-24.
- [6] 屠幼萍, 陈聪慧, 佟宇梁, 等. 现场运行复合绝缘子伞裙材料的老化判断方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2522-2527.
- TU Youping, CHEN Conghui, TONG Yuliang, et al. Aging characteristics of shed materials of silicone rubber composite insulators in service[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2522-2527.
- [7] 贾伯岩. 运行后复合绝缘子的理化分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 914-921.
- JIA Boyan. Physics and chemistry analysis on composite insulators after operated[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 914-921.
- [8] 惠华, 王森, 杨博, 等. 复合绝缘子运行状态和老化性能评估方法研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(1): 64-66.
- XI Hua, WANG Sen, YANG Bo, et al. Research on operational status and evaluation method for aging characteristics of composite insulators[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(1): 64-66.
- [9] 鲁大勇, 李朝伟, 史敬天, 等. 电晕老化对硅橡胶材料热刺激电流和表面情况影响研究[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 93-98.
- LU Dayong, LI Chaowei, SHI Jingtian, et al. Study of the corona aging effect to TSC and SEM of silicone rubber materials[J]. High Voltage Engineering, 2014, 50(8): 93-98.
- [10] 彭银波, 李轩, 陈嘉, 等. 不同运行年限复合绝缘子表面护套特性的研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 67-72.
- PENG Yinbo, LI Xuan, CHEN Jia, et al. Surface characteristics of sheath of composite insulators with different service years[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 67-72.
- [11] 屠幼萍, 罗梅馨, 应高峰, 等. 硅橡胶电晕老化热刺激电流特性的正交试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 139-144.
- TU Youping, LUO Meixin, YING Gaofeng, et al. Research on TSC characteristics of corona aging of silicone rubber with orthogonal test method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 139-144.
- [12] 应高峰. 基于正交试验方法的硅橡胶电晕老化特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- YING Gaofeng. Study on the corona aging properties of silicone rubber material based on orthogonal test method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [13] 王高勇. 有机绝缘材料电晕老化测试系统的研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- WANG Gaoyong. Development of corona aging test system for organic insulating materials[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [14] 蓝磊, 王汉良, 文习山, 等. 高温硫化硅橡胶加速电晕老化试验分析及其寿命预测[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 782-789.
- LAN Lei, WANG Hanliang, WEN Xishan, et al. Accelerated corona aging tests analysis and lifetime prediction of HTV silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 782-789.
- [15] DU B X, LIU Y, WANG R L. Effects of corona discharge on surface deterioration of silicone rubber insulator under reduced pressures[C]//International Symposium on Electrical Insulating Materials. [S.l.]: IEEE, 2008: 271-274.
- [16] MORENO V M, GORUR R S. Effect of long-term corona on non-ceramic outdoor insulator housing materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1): 117-128.
- [17] 梁曦东, 李震宇, 周远翔. 交流电晕对硅橡胶材料憎水性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 19-23.
- LIANG Xidong, LI Zhenyu, ZHOU Yuanxiang. Influences of AC corona on hydrophobicity of silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(27): 19-23.
- [18] 陈玉, 成永红, 孙颖, 等. 指形电极结构设计及其对快脉冲真空闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 761-765.
- CHEN Yu, CHENG Yonghong, SUN Ying, et al. Design of finger electrode configuration and its effect on pulsed vacuum flashover[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 761-765.
- [19] 高岩峰, 王家福, 梁曦东, 等. 交直流电晕对高温硫化硅橡胶性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 274-284.
- GAO Yanfeng, WANG Jiafu, LIANG Xidong, et al. Influence of AC and DC corona on high temperature vulcanized silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 274-284.
- [20] 梁英, 李成榕, 丁立健. 电晕强度对 HTV 硅橡胶陷阱特性的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 135-140.
- LIANG Ying, LI Chengrong, DING Lijian. Effect of corona intensity on the trap property of HTV silicone rubber[J].

(下转第 156 页)

- 组成和发电机与负荷间功率输送关系的快速分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 22-26.
- WEI Ping, NI Yixin, WU Fuli, et al. Power transfer allocation for open access using graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 22-26.
- [17] WEI Ping, YUAN Bin, NI Yixin, et al. Power flow tracing for transmission open access[C]//IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. London: [s.n.], 2000: 476-481.
- [18] 谢开贵, 李春燕, 赵 渊, 等. 电力系统功率分配的解析模型和算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 27-31.
- XIE Kaigui, LI Chunyan, ZHAO Yuan, et al. Electrical analytical model and algorithm for distributing power using the downstream distribution matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 27-31.
- [19] QU Zhijiang, QIN Jianhua, WANG Xintao, et al. A power flow tracing method based on the circuit analysis of power supply path[C]//Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China: IEEE, 2011: 1-6.
- [20] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-32.
- WU Junling, ZHOU Shuangxi, SUN Jianfeng, et al. Analysis on maximum power injection of wind farm connected to power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 28-32.
- [21] 张 元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
- ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [22] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [23] 曹 娜, 赵海翔, 陈默子, 等. 潮流计算中风电场的等值[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 53-56.
- CAO Na, ZHAO Haixiang, CHEN Mozi, et al. Equivalence method of wind farm in steady-state load flow calculation[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 53-56.
- [24] 黄泽荣, 彭建春, 肖文娴, 等. 基于耗散功率转归分量的网损微增率新算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 31-36.
- HUANG Zerong, PENG Jianchun, XIAO Wenxian, et al. Incremental transmission loss algorithm based on the imputation of an impedance-branch dissipation power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 31-36.
- [25] 彭建春, 江 辉. 基于两步联盟博弈的输电网损耗分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 57-63.
- PENG Jianchun, JIANG Hui. A two-step coalitional game based transmission losses allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 57-63.
- [26] 吴义纯, 丁 明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 36-39.
- WU Yichun, DING Ming, ZHANG Lijun. Power flow analysis in electrical power networks including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 36-39.
- 钟 浩(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行控制及风力发电技术。
- 周 倩(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制。
- 张春阳(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制。

(上接第148页)

- High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 135-140.
- [21] 罗志娟. 新型介质阻挡放电特性的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- LUO Zhijuan. Study on the characteristics of new dielectric barrier discharge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [22] 梁 英. 高温硫化(HTV)硅橡胶电晕老化特性及机理的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- LIANG Ying. Study on the corona aging characteristics and mechanism of HTV silicone rubber[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [23] 覃永雄, 虞 澜, 傅 佳, 等. 长波紫外照射下高温硫化硅橡胶的微观物性及憎水性研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 242-250.
- QIN Yongxiong, YU Lan, FU Jia, et al. Research on microscopic properties and hydrophobicity of high temperature vulcanization silicone rubber under long-wave ultraviolet radiation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 242-250.
- [24] 陈晓春, 李洛琦, 吴照国, 等. 挂网运行复合绝缘子伞裙性能研究[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 104-108.
- CHEN Xiaochun, LI Luoqi, WU Zhaoguo, et al. Research on shed properties of network operating composite insulators[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(6): 104-108.
- 董平平(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术。
- 杨 茹(1979—), 女, 高级工程师, 从事电网运行管理工作。
- 陈永明(1979—), 男, 高级工程师, 从事电网运行管理工作。
- 高丽娟(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术。