

大气参数对导线交流起晕电压的影响及校正

胡琴, 舒立春, 蒋兴良, 孙才新, 袁前飞, 杨占刚

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

Effect of Atmospheric Factors on AC Corona Inception Voltage of Conductors and Its Correction

HU Qin, SHU Lichun, JIANG Xingliang, SUN Caixin, YUAN Qianfei, YANG Zhangang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Variation of air temperature, pressure and humidity along the line corridor in high altitude area will affect the corona characteristics of conductors. However, the research on comprehensive effects of these atmospheric factors is rare. Therefore, AC corona discharge experiments on four kinds of smooth conductors with different diameter are performed in large-scale artificial climate chamber where air temperature, pressure and humidity can be adjusted. Experimental results indicate that the effect of variation of air temperature on corona inception voltage is not obvious when air pressure and absolute humidity keep constant. With the increase of absolute humidity, the effect of air pressure on corona inception voltage will reduce, shows such features that in region of low humidity, corona inception voltage increases slowly with the increase of absolute humidity, and good accordance is achieved between the measured and calculated results, while in region of high humidity, corona inception voltage decreases, and the difference between the measured and calculated results is big due to condensation on conductor, which distorts the surface electric field of conductors. Besides, The calculation formula and predicting method for corona inception voltage are presented, with conductor diameter, air pressure and humidity considered.

KEY WORDS: conductor; corona inception voltage; air temperature; air pressure; humidity

摘要: 高海拔线路走廊的环境温度、气压及湿度变化较大, 这对导线的电晕特性会产生一定的影响, 目前关于这些大气参数综合作用下的导线电晕特性研究较少。在大型人工气候室改变气温、湿度及气压, 对4种直径的光滑导线模型进行了交流电晕试验。结果表明: 在气压与绝对湿度一定的情况

下, 单纯改变气温对起晕电压的影响很小; 气压对起晕电压的影响随绝对湿度的增加而减小; 在低湿度区, 起晕电压随绝对湿度的增加缓慢上升, 在高湿度区则会下降。模型计算结果与试验值在低湿度区吻合较好, 但在高湿度区偏差较大。指出现有模型未考虑高湿度下导线表面的凝露是导致计算结果与试验结果误差较大的原因, 得出了考虑不同导线直径、气压、湿度影响的起晕电压计算公式与预测方法。

关键词: 导线; 电晕起始电压; 空气温度; 气压; 湿度

0 引言

当输电线路导线表面的电场强度超过电晕起始场强时, 在导线表面就会产生电晕放电现象, 满足限制导线电晕的要求是输电线路设计中的关键技术。我国西部具有丰富的水电资源, 在“西电东送”中, 输电线路不可避免地穿越高海拔复杂环境地区。温度、湿度、气压这些大气参数对导线起晕电压有显著的影响^[1-5]。国内外有关温度对起晕电压影响的研究大多数针对针-板间隙, 且温度变化范围很大, 鲜见环境温度对输电导线起晕电压影响的报道^[6-7]。湿度对导线电晕特性的影响比较复杂, 国内外已开展了大量研究。文献[8]对离地 6.4 m、直径为 28.2 mm 导线的研究表明: 正极性起晕电压随相对湿度的增加而缓慢增加; 对离地 0.01 m、直径 0.0445 mm 的细线得出的结论则与其相反。文献[9-10]对棒电极半径 1 mm、棒-板间距 4 cm 的棒-板间隙模型的研究结果表明: 起晕电压随绝对湿度的增加缓慢下降, 正极性与负极性电压下具有相似的规律。文献[11]对内径 0.9 mm、外径为 12.5 cm 的同轴圆柱内电极电晕的试验结果表明: 在交流及直流负极性下, 起晕电压随相对湿度增加呈现先增加后下降的趋势, 而直流正极性下则呈上升趋势,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB-724502)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724502).

这与文献[12-13]的结果类似。由此可见：由于试品、试验条件及研究方法的差异，各研究者得到的结论彼此差异较大，且一般采用微缩试验模型，结果难以直接应用于实际线路。此外，各种大气参数之间的关系十分复杂，很少有研究者研究多种大气参数综合作用下导线的交流电晕特性。

目前还没有电晕起始电压大气校正的国家及行业标准，而起晕电压的海拔校正方法也只限于线路用金具与绝缘子^[14]。如 GB/T 2317.2—2000^[15]和 GB/T 75.2—2003^[16]提出了金具和绝缘子电晕的海拔修正方法，但均未考虑空气湿度对电晕起始电压的影响。IEC 60060-1—1989 标准^[17]推荐使用 g 参数法对外绝缘破坏性放电电压进行气压和湿度的校正，但并未指出该方法适用于导线起晕电压的校正，且该标准只适用于海拔 2000 m 以下的地区^[17]。因此，导线起晕电压的大气校正方法还有待进一步研究。

本文在人工气候室内通过试验研究了环境温度、气压和空气湿度对导线交流起晕电压的影响，并与电晕起始放电模型的计算结果进行了对比；提出了综合考虑导线直径、气压和湿度影响的导线交流起晕电压计算公式及预测方法。

1 不同大气参数下导线的电晕特性试验

1.1 试品、试验装置及试验方法

由于工程实际采用的绞线表面不光滑，起晕的分散性较大^[18]，为更好地进行理论研究，采用了与工程中常用的 LGJ-95/55、LGJ-185/30、LGJ-240/40、LGJ-300/70 钢芯铝绞线外径相同的光滑铜管模型进行电晕试验，铜管外径分别为 16、19、22、25 mm，长度均为 2.3 m。为防止铜管两端起晕，在铜管两端分别放置了 $\phi 450/150$ mm 的铝质均压环，试品铜管如图 1 所示。



图 1 光滑铜管模型

Fig. 1 Smooth copper pipe model

试验在大型多功能人工气候室内进行。圆柱形人工气候室内直径为 7.8 m，内净空高度为 11.6 m。通过制冷机可将气候室内的温度调低至 -45 °C；通过真空泵可使气候室内的最低气压降至 30 kPa；使用抽湿机和气候室内的喷淋系统，可在 20%~100% 范围内调节气候室内的相对湿度。试验中气压

P (kPa)、相对湿度 H_r (%) 与环境温度 t (°C) 通过置于人工气候室内的温/湿度和气压综合数字式测量仪进行测量，通过查表可得绝对湿度 H_a (g/m³) 等参数。试验电压由 500 kV/2 000 kVA 无晕试验变压器提供；导线起晕电压使用紫外线成像仪并依据文献[19]的方法确定；试验原理接线如图 2 所示。

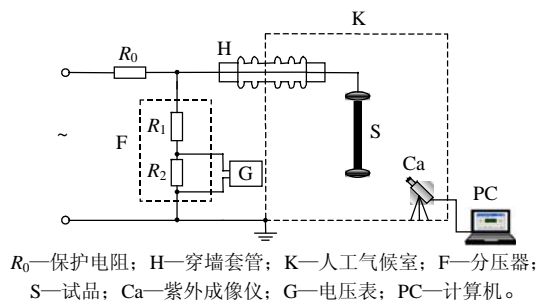


图 2 试验回路示意

Fig. 2 Test circuit

1.2 试验布置与实际线路的等价性问题

使用有限元软件对本文铜管模型的表面电场分布进行计算(计算时忽略引线的影响)，并对实际架空单导线表面电场分布进行计算(计算时未考虑绞线系数和其他相导线的影响)，从以下 3 个方面来评估本文的试验布置与实际线路布置的等价性关系：

1) 导线表面法向电场的均匀度。铜管位于人工气候室中心，其表面法向电场在各个方向均相等。对直径 16 mm 的实际架空单导线而言，取导线离地间距为 7 m^[20]，其表面法向电场的最小值与最大值之比为 0.9735，与本文试验布置导线表面法向电场分布基本相同。

2) 导线表面法向电场的衰减情况。以 $\phi 16$ mm 导线为例，从导线表面到距离导线表面 5 cm 时(电离层厚度一般小于 5 cm)，导线模型与实际架空单导线法向电场分别衰减为最大值的 13.8% 和 13.7%，两者基本相等。

3) 对本文中各直径导线，取导线离地间距为 7 m，导线表面最大法向电场相等时，实际线路对应的电压均约为铜管模型对应电压的 1.34 倍。

2 导线交流电晕起始电压的物理数学模型

2.1 电晕起始的过程及物理数学模型

交流电压作用下，随着外施电压的增加，交流负半周首先发生电晕放电，交流正半周起晕电压稍高，因此交流电晕起始主要决定于负半周。负电晕的产生和阴极表面电子发射之间有着密切的关系，电晕放电能否自持取决于初始电子崩能否在阴极表面产生一个二次电子崩发展所需的自由电子。将

光电效应从阴极产生的电子辐射机制用于本文的电晕放电起始模型中^[8-9,21]。图3为导线周围电子崩发展的示意图,图中: r 为导线半径; l 为某一点距离导线中心的距离; l_p 、 l_i 分别为初始电子崩崩头及电离区边界距导线中心距离。

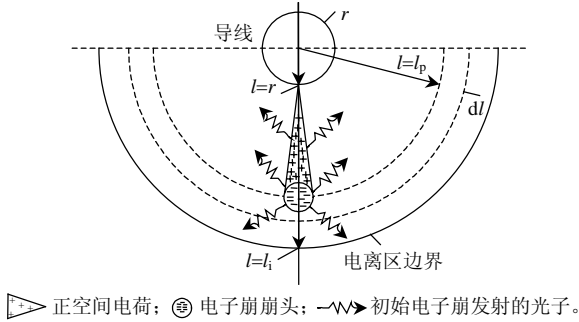


图3 导线周围电子崩发展的示意
Fig.3 Development of electron avalanche around conductor

导线附近空间电场增大到一定程度,使得电子碰撞电离系数 α 大于附着系数 η 的区域称为电离区域。假设在负极性导线表面存在1个自由电子,它会向同轴圆柱外电极方向发展形成初始电子崩。当初始电子崩发展到 l_p 处时,电子崩中包含的电子数 $N(l_p)$ 为

$$N(l_p) = \exp \int_0^{l_p} [\alpha(l) - \eta(l)] dl \quad (1)$$

当电子崩从阴极表面发展到电离区域边界 l_i 处时,有效电离系数 $\alpha - \eta < 0$,电子崩中的电子停止倍增,逐渐附着到分子上形成负离子,产生的光子数量很小。因此,计算到达阴极表面的光子产生的表面光电子的数目时,只考虑电离区域内产生的光子。如果到达阴极表面的光子在表面至少产生1个光电子,便可以形成二次电子崩,电晕放电能够自持,如式(2)所示:

$$N_{\text{epb}} = \gamma_p \int_r^{l_i} \alpha(l) \exp \left\{ \int_r^l [\alpha(l') - \eta(l')] dl' \right\} \cdot g(l) e^{-\mu l} dl \geq 1 \quad (2)$$

式中: γ_p 为电极表面光电子发射系数; α 为电离系数; μ 为空气里光子的吸收系数; g 为电极有效吸附光子的几何系数。

计算电晕起始电压时,首先须得到空间的静电场分布,本文采用有限元法进行计算。计算所采用的电极结构与1.1节中试验所采用结构相同。计算过程中,以 ΔU 为步长单元不断升高电压,将电离系数 $\alpha(l)$ 和附着系数 $\eta(l)$ 与电场强度的函数关系代入式(2)中,等式成立时对应的电压为电晕起始电压 U_c 。

2.2 模型中计算参数的选取

在通常的大气温度和压强下,干空气及未饱和的湿空气都接近于理想气体。大气总压力 P 可表示为干空气分压力 P_d 与水蒸气分压力 P_w 之和($P = P_d + P_w$),气体放电中的 α 、 η 、 μ 等参量均可分解为干空气和水蒸气中对应参数的加权和^[8],如电离系数 α 可表示为

$$\alpha = \frac{P - P_w}{P} \alpha_d + \frac{P_w}{P} \alpha_w \quad (3)$$

式中 α_d 、 α_w 分别为干空气和水蒸气中的电离系数,这些系数均为场强和气压之比(E/P)的函数。 η 、 μ 可采用同样的方法求得,文献[8]给出了这些函数关系。 P_w 可由式(4)求得

$$P_w = \frac{H_a (273 + t)}{289} \quad (4)$$

γ_p 的取值范围在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 数量级^[8-9],计算中发现,起晕电压的计算结果对 γ_p 的变化不敏感,如 γ_p 取0.001和0.0001时,起晕电压 U_c 分别为228.4和233.4 kV(计算条件: $t = 20^\circ\text{C}$, $H_a = 11 \text{ g/m}^3$, $P = 98.7 \text{ kPa}$,导线直径16mm),两者仅相差2.1%,本文在计算中取 $\gamma_p = 0.0005$ 。对于导线而言,几何系数 g 取0.5^[8]。

3 试验结果及分析

3.1 空气温度对导线起晕电压的影响

由于空气温度对其他大气参数的影响很大,空气温度对导线电晕特性的影响比较复杂;因此对直径为16mm的导线进行了2组试验:

1) 保持绝对湿度与气压不变($P = 98.7 \text{ kPa}$, $H_a = 7 \text{ g/m}^3$),改变气候室内温度(0、5、10、15、20、25 $^\circ\text{C}$)进行电晕试验。

2) 保持相对湿度与气压不变($P = 98.7 \text{ kPa}$, $H_r = 70\%$),改变气候室内温度(0、5、10、15、20、25 $^\circ\text{C}$)进行电晕试验。

2组试验的试验结果如图4所示,可以看出:

1) 绝对湿度与气压不变时,随着温度的升高,起晕电压基本保持不变,这与模型计算结果吻合较好。说明绝对湿度与气压不变时,单纯改变环境温度对起晕电压的影响很小。

2) 在相对湿度与气压不变时,随着环境温度的升高,起晕电压缓慢上升,与模型计算结果吻合较好。这是因为相对湿度与气压不变时,环境温度的上升会引起绝对湿度的增加,从而导致起晕电压缓慢上升。

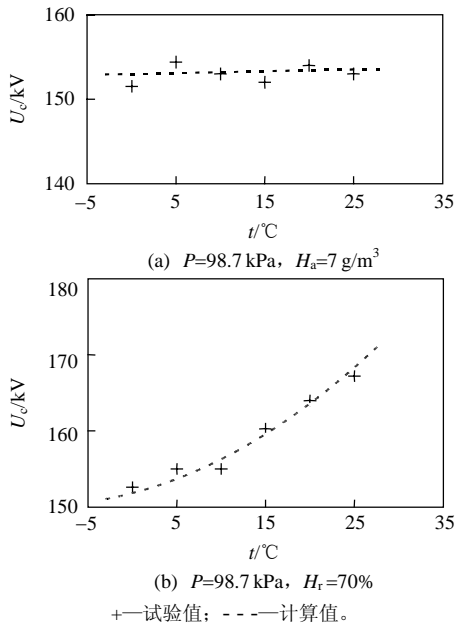


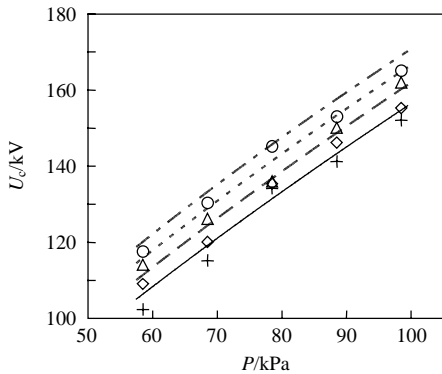
图4 起晕电压 U_c 与环境温度 t 的关系($\phi 16$ mm 铜管)
Fig. 4 Relation between U_c and t ($\phi 16$ mm copper pipe)

3.2 气压对导线交流起晕电压的影响

根据前文分析,在气压和绝对湿度保持一定时,单纯改变气温对导线起晕电压的影响不大;因此在研究气压和湿度对导线起晕电压的影响时,不再使用制冷或加热装置调节气候室内温度,而是在室温的条件下进行试验,试验时气候室内所测的温差不超过 10°C 。

试验得到了 H_a 约为 $5、9、13、17.3 \text{ g/m}^3$ 时 $\phi 16$ mm 光滑铜管模型起晕电压与气压的关系(如图5所示),图中各点为试验结果,曲线为按2.1节中模型计算得到的结果。计算结果与试验结果均表明,气压每下降 10 kPa ,导线交流起晕电压约降低 7% 。

由于气压 P 与空气温度 t 、绝对湿度 H_a 之间满



+—试验值(5 g/m^3); Δ —试验值(9 g/m^3); \circ —试验值(13 g/m^3);
 \diamond —试验值(17.3 g/m^3); ————计算值(5 g/m^3); - - - - -计算值(9 g/m^3);
.....—计算值(13 g/m^3); - · - · - 计算值(17.3 g/m^3)。

图5 不同 H_a 下 U_c 与 P 的关系($\phi 16$ mm 铜管)
Fig. 5 Relation between U_c and P under different H_a ($\phi 16$ mm copper pipe)

足如下关系:

$$P=(\delta+5.0737 \times 10^{-4} H_a) \times 343.8122(273+t) \quad (5)$$

式(5)可以反映空气密度 δ 、温度和湿度对起晕电压的综合影响。导线交流起晕电压与气压比 ($P^*=P/P_0$) 的关系^[22-23]可表示为

$$U_c=U_0(P/P_0)^k=U_0(P^*)^k \quad (6)$$

式中: U_c 为气压 P 时的电晕起始电压, kV ; U_0 为在气压为标准大气压时的电晕起始电压, kV ; k 为气压影响起晕电压的特征指数。将试验结果按式(6)拟合,可得到不同绝对湿度时的 U_0 、 k 及标准误差 R^2 , 如表1所示。

表1 不同 H_a 下的 U_0 、 k 及标准误差 R^2 ($\phi 16$ mm 铜管)
Tab. 1 U_0 , k and R^2 under different H_a ($\phi 16$ mm copper pipe)

$H_a/(\text{g/m}^3)$	U_0/kV	k	R_0
5	157.5	0.771 0	0.983 3
9	164.0	0.671 5	0.995 6
13	168.5	0.648 0	0.994 9
17.3	154.6	0.634 3	0.998 5

将不同绝对湿度下的气压影响特征指数 k 进行对比,可以发现:随着绝对湿度的增加,气压影响特征指数下降。这说明随着绝对湿度的增加,气压对起晕电压的影响越小。

3.3 湿度对导线交流起晕电压的影响

本文得到了气压 P 约为 $98.7、88.7、78.7、68.7、58.7 \text{ kPa}$ 时,绝对湿度 H_a 与 $\phi 16$ mm 铜管交流起晕电压 U_c 之间的关系(如图6所示)。图中各点为试验结果,曲线为根据2.1节中模型计算得到的结果。

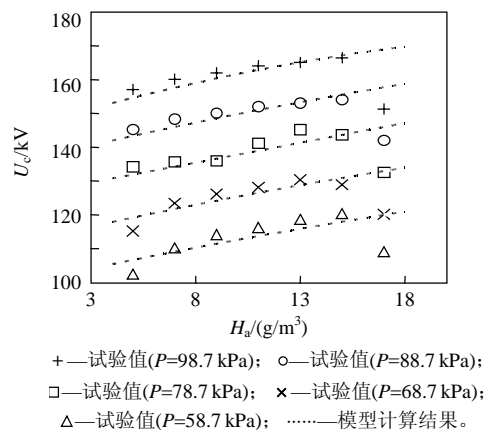


图6 不同 P 下 U_c 与 H_a 的关系($\phi 16$ mm 铜管)
Fig. 6 Relation between U_c and H_a under different P ($\phi 16$ mm copper pipe)

由图6可知,在不同气压下:

1) 绝对湿度在 $5 \sim 15 \text{ g/m}^3$ 时,导线交流起晕电压随绝对湿度的增加呈现缓慢上升的趋势。试验结果与模型计算结果吻合较好,最大偏差不超过 5% 。

2) 绝对湿度为 17.3 g/m^3 时, 起晕电压放电分散性较大, 起晕电压明显下降。这时模型计算结果与试验结果之间有较大的偏差, 最大相差达 13.4%。

本文利用金相显微镜, 对高湿度下光滑导线表面的凝露现象进行了观测。结果表明: 在一定的导线温度、环境温度及空气湿度的配合下, 导线表面可能会产生凝露现象(如图 7 所示, 试验条件: 导线温度 20°C , 环境温度 22.4°C , 绝对湿度 17.3 g/m^3 , 施加 100 kV 的交流电压之后), 露珠对导线表面的电场会产生畸变作用, 从而导致高湿度下导线交流起晕电压的下降。

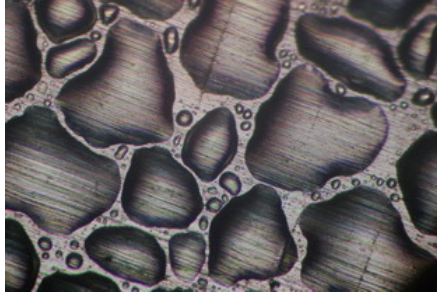


图 7 导线表面的凝露现象

Fig. 7 Condensation phenomenon on conductor

4 导线交流电晕起始电压的大气参数校正

由表 1 可知, 随着湿度的增加, 气压对起晕电压的影响逐渐减小。实际上, 若不考虑高湿度下导线凝露的影响, 从图 6 试验结果的上升部分可以看出, 随着气压的增加, 起晕电压随绝对湿度的变化越来越平坦。这说明气压增加, 绝对湿度对起晕电压的影响也会减小。这是因为当 H_a 不变而 P 降低时, 单位体积内的水分子数不变, 而气体分子总量减少, 水分子和气体分子总量的比值变大, H_a 对 U_c 的影响必然增大。因此, 考虑湿度的附加影响时, 采用比湿 H_a/P^* 代替 H_a 作为校正参数从物理概念上来说是比较合适的。式(6)可修正为

$$U_c = U'_0 (P^*)^m (1 + H_a / P^*)^n \quad (7)$$

式中: U'_0 为 $P=P_0$, $H_a=0 \text{ g/m}^3$ (干空气) 时的电晕起始电压; m 为气压比 P^* 影响电晕起始电压的特征指数; n 为湿度影响电晕起始电压的特征指数。

采用多元非线性回归方法, 将 $\phi 16 \text{ mm}$ 光滑导线的试验结果按式(7)拟合, 可得:

$$U_c = 147.9 (P^*)^{0.7246} (1 + H_a / P^*)^{0.0425} \quad (8)$$

同理, 根据对 $\phi 19 \text{ mm}$ 、 $\phi 22 \text{ mm}$ 、 $\phi 25 \text{ mm}$ 光滑导线的试验结果, 可以得到:

$$U_{c,19 \text{ mm}} = 162.2 (P^*)^{0.7409} (1 + H_a / P^*)^{0.0566} \quad (9)$$

$$U_{c,22 \text{ mm}} = 180.9 (P^*)^{0.7748} (1 + H_a / P^*)^{0.0602} \quad (10)$$

$$U_{c,25 \text{ mm}} = 189.9 (P^*)^{0.8097} (1 + H_a / P^*)^{0.0826} \quad (11)$$

由于本文采用的试验模型为同轴圆柱电极结构, 导线表面的起晕电场强度 $E_c (\text{kV/cm})$ 与起晕电压 U_c 的关系可表示为

$$U_c = r \ln(R/r) E_c \quad (12)$$

式中 R 、 r 分别为人工气候室半径及导线半径, cm 。由于在相同的大气条件下, E_c 基本保持一定, 若以 $\phi 16 \text{ mm}$ 光滑导线的起晕电压为基准, 其他直径导线的起晕电压与 $\phi 16 \text{ mm}$ 导线起晕电压的比值 s 可表示为

$$s = \frac{U_c}{U_{c,16 \text{ mm}}} = \frac{r \ln(3800/r)}{8 \ln(3800/8)} \quad (13)$$

由式(13)可以计算出 $\phi 19 \text{ mm}$ 、 $\phi 22 \text{ mm}$ 、 $\phi 25 \text{ mm}$ 光滑导线对应的 s 值分别为 1.15、1.30、1.45。

假设考虑不同导线直径 D (mm) 时的起晕电压计算公式可表示为

$$U_c = U'_0 (P^*)^p (1 + H_a / P^*)^q (D/16)^v \quad (14)$$

式中: U'_0 、 p 、 q 分别与 U'_0 、 m 、 n 具有相同的含义; v 为导线直径影响起晕电压的特征指数。根据试验结果按式(14)进行多元回归分析, 可得:

$$U_c = 142.2 (P^*)^{0.7625} (1 + H_a / P^*)^{0.0605} (D/16)^{0.7485} \quad (15)$$

同时, 根据式(15)可知, 对于不同直径导线, 在相同的大气条件下, $\phi 19 \text{ mm}$ 、 $\phi 22 \text{ mm}$ 、 $\phi 25 \text{ mm}$ 光滑导线起晕电压与 $\phi 16 \text{ mm}$ 导线起晕电压的比值分别为 1.14、1.27、1.40, 这与式(13)得到的 s 值比较接近, 表明了式(14)的合理性。

5 使用支持向量回归预测起晕电压及各种计算方法的对比

由于导线起晕电压与气压、湿度、导线直径的关系较为复杂, 使用简单的统计模型计算可能会有较大的误差, 支持向量回归采用结构风险最小化原理, 同时最小化训练样本的经验风险和置信范围来保证学习的推广性, 对小样本情况有较好的泛化性能, 适用于各种条件影响下导线起晕电压的预测。针对本文的 140 个试验样本, 随机抽取其中 100 个作为训练集来训练回归模型, 其余 40 个作为测试集对预测模型进行验证。支持向量回归模型通过解对偶优化问题得拉格朗日乘子 α 、 α^* 及阈值 b , 进而可得回归预测函数^[24]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) k(x, x_i) + b \quad (16)$$

式中: i 为支持向量的个数; $k(x, x_i)$ 为核函数。训练过程中, 采用粒子群优化算法对支持向量回归模型

中的参数进行优化,使得模型的训练误差达到最小。得到回归模型后,用得到的回归模型对预测样本集作出预测。

支持向量回归模型训练过程中核函数选用径向基核函数;回归模型中的参数采用粒子群优化算法在参数空间寻找最优参数组合^[25]。由于得到的140个训练模型的最优参数组合及回归预测模型中的拉格朗日乘子 α 、 α^* 、阈值 b 均不相同,不一列出。

本文将2.1节中模型计算结果(方法1)、式(14)计算结果(方法2)、支持向量回归预测结果(方法3)与试验结果进行了对比,对比结果如表2所示。限于篇幅,表2仅列出了每种直径导线分别用3种方法计算起晕电压时误差最大的数据(每种方法的最大误差用粗体表示)。

表2 3种计算方法与试验结果的对比
Tab. 2 Comparison between calculation results and test results with different method

导线 直径/ mm	$P/$ kPa	$H_a/$ (g/m^3)	试验 结果/ kV	方法1		方法2		方法3	
				计算值/ kV	误差/ %	计算值/ kV	误差/ %	计算值/ kV	误差/ %
16	98.5	17.3	151.3	168.9	11.7	166.1	9.8	155.3	2.6
16	58.5	15.0	120.3	117.9	-2.0	114.2	-5.1	115.2	-4.2
19	68.5	11.0	140.8	143.8	2.1	142.6	1.3	147.6	4.8
19	58.5	17.3	123.1	137.4	11.6	130.8	6.3	124.8	1.4
22	58.5	15.0	151.8	151.1	-0.5	144.9	-4.5	144.6	-4.7
22	58.5	17.3	135.7	153.9	13.4	146.0	7.6	137.1	1.0
25	98.5	15.0	228.9	235.8	3.0	230.3	0.6	239.1	4.5
25	98.5	17.3	248.1	238.7	-3.8	231.9	-6.5	248.1	0.0
25	68.5	17.3	171.2	187.9	9.7	179.5	4.9	171.2	0.0

通过比较发现:在 $H_a=17.3 \text{ g}/\text{m}^3$ 时,利用放电模型计算得到的结果与试验结果之间的误差较大,最高达13.4%,这是因为放电模型中未考虑高湿度下导线凝露对电场畸变的影响。利用式(14)计算的结果与试验值之间的误差小于10%,式(14)可用作工程上计算起晕电压的简易公式。利用支持向量回归方法得到的起晕电压与试验结果吻合较好,误差不超过5%。

6 结论

1) 气压与绝对湿度保持一定的情况下,单纯改变气温对导线交流起晕电压的影响很小;但气温的变化往往会导致其他大气参数的变化,从而影响起晕电压。

2) 气压每下降10kPa,导线交流起晕电压约降低7%;但随着绝对湿度的增加,气压对起晕电压的影响减小。

3) 绝对湿度在 $5\sim 15 \text{ g}/\text{m}^3$ 时,导线交流起晕电压随绝对湿度的增加呈现缓慢上升的趋势;当绝对湿度为 $17.3 \text{ g}/\text{m}^3$ 时,起晕电压明显下降,原因是高湿度下导线表面出现了凝露而引起了电场畸变。

4) 通过对本文提出的3种导线交流起晕电压计算方法与试验结果的对比发现:在导线表面未出现凝露时,由电晕放电物理数学模型计算的起晕电压与试验值吻合很好;但在高湿度下导线出现凝露时,该模型计算结果与试验值之间偏差较大;使用本文得到的大气校正公式及支持向量回归方法预测起晕电压的误差分别不超过10%和5%。

致谢

本文的研究工作得到了输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学)项目(2007DA-10512708102)的资助,谨此致谢。

参考文献

- [1] 舒立春, 赖向平, 蒋兴良, 等. 直流正极性下冰柱-冰板电极中电晕放电量的分析[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 52-57.
Shu Lichun, Lai Xiangping, Jiang Xingliang, et al. Analysis on DC positive corona discharge quantity in icicle to iced plate electrode system[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 52-57(in Chinese).
- [2] 马俊, 蒋兴良, 张志劲, 等. 交流电场对绝缘子覆冰形成的影响机理[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 11-15.
Ma Jun, Jiang Xingliang, Zhang Zhijin, et al. Impact mechanism of AC electric field on formation of icing on insulators[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 11-15(in Chinese).
- [3] 曾庆禹. 特高压输电线路电气和电晕特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 1-8.
Zeng Qingyu. Study on electric characteristic and corona performance of UHV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 1-8(in Chinese).
- [4] 万保权, 饶宏, 郭雄, 等. 云广±800kV 直流换流站管母线电晕特性及优化研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 52-55.
Wan Baoquan, Rao Hong, Guo Xiong, et al. Study on tubular busbar corona characteristics and optimization of ±800 kV Yun-Guang HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 52-55(in Chinese).
- [5] 肖冬萍, 何为, 谢鹏举, 等. 高压输电线路电晕放电特性及其电磁辐射场计算[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 58-61.
Xiao Dongping, He Wei, Xie Pengju, et al. Study on corona discharge characteristic of high voltage transmission line and calculation of its electromagnetic radiation field[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 58-61(in Chinese).
- [6] Abdel-Salam M, Allen N. Onset voltage of positive glow corona in rod-plane gaps as influenced by temperature[J]. IEEE Proceedings: Science Measurement and Technology, 2005, 152(5): 227-232.
- [7] 王伟, 丁燕生, 李成榕, 等. 空气温度对电晕笼中导线直流电晕特性的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 613-617.
Wang Wei, Ding Yansheng, Li Chengrong, et al. Effect of air temperature on DC conductor corona performance in corona cage[J].

- High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 613-617(in Chinese).
- [8] Abdel-Salam M. Positive wire-to-plane coronas as influenced by atmospheric humidity[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1985, 21(1): 35-40.
- [9] 卞星明, 惠建峰, 黄海鲲, 等. 气压湿度对负直流电晕特性影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 118-124.
Bian Xingming, Hui Jianfeng, Huang Haikun, et al. Effects of air pressure and humidity on the characteristics of negative DC corona [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 118-124(in Chinese).
- [10] 惠建峰, 关志成, 王黎明, 等. 正直流电晕特性随气压和湿度变化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 53-58.
Hui Jianfeng, Guan Zhicheng, Wang Liming, et al. Research on variation of positive DC corona characteristics with air pressure and humidity[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 53-58(in Chinese).
- [11] 王清亮, 张璐, 李舟, 等. 空气湿度对导线电晕起始电压的影响[J]. 电力建设, 2009, 30(8): 38-41.
Wang Qingliang, Zhang Lu, Li Zhou, et al. Influence of humidity on conductor corona onset voltage[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(8): 38-41(in Chinese).
- [12] 安冰, 丁燕生, 王伟, 等. 湿度对电晕笼中导线直流电晕特性的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 98-104.
An Bing, Ding Yansheng, Wang Wei, et al. Influence of humidity on corona performance of DC conductor in corona cage[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 98-104(in Chinese).
- [13] 刘有为, 李继红, 李斌. 空气密度和湿度对导线电晕特性的影响[J]. 电网技术, 1990, 14(4): 46-50.
Liu Youwei, Li Jihong, Li Bin. Effect of air density and humidity on conductor corona performances[J]. Power System Technology, 1990, 14(4): 46-50(in Chinese).
- [14] 范建斌, 谷琛, 李军, 等. ± 800 kV 典型直流设备电晕起始电压的海拔校正方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 8-13.
Fan Jianbin, Gu Chen, Li Jun, et al. Altitude correction method for corona onset voltage of ± 800 kV typical DC equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 8-13(in Chinese).
- [15] 全国电力架空线路标准化技术委员会. GB/T 2317.2—2000 电力金具电晕和无线电干扰试验[S]. 北京: 中国标准出版, 2000.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 775.2—2003 绝缘子试验方法第 2 部分: 电气试验方法[S]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [17] IEC. IEC 60060-1—1989 high-voltage test techniques, part 1: general definitions and test requirements[S]. 2nd edition. Geneva: IEC, 1989.
- [18] 蒋兴良, 林锐, 胡琴, 等. 直流正极性下绞线电晕起始特性及影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 108-114.
Jiang Xingliang, Lin Rui, Hu Qin, et al. DC positive corona inception performances of stranded conductors and its affecting factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 108-114(in Chinese).
- [19] 舒立春, 宫林, 蒋兴良, 等. 水滴或污秽对导线电晕放电起始特性的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 633-637.
Shu Lichun, Gong Lin, Jiang Xingliang, et al. Corona inception discharge characteristics of conductor adhered with water drops or pollution[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 633-637(in Chinese).
- [20] 国家质量监督局. GB50293—1999 城市电力规划规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [21] Abdel-Salam M, Turkey A, Hashem A. The onset voltage of coronas on bare and coated conductors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(45): 2550-2556.
- [22] 舒立春, 赖向平, 余德芬, 等. 气压对直流正极性下冰柱-冰板间隙电晕放电的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 116-120.
Shu Lichun, Lai Xiangping, Yu Defen, et al. Influence of atmospheric pressure on DC positive corona discharge in icicle to iced plate electrode system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 116-120(in Chinese).
- [23] 赖向平, 舒立春, 蒋兴良, 等. 冰凌针-板直流正极性下起始电晕特性的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 32-36.
Lai Xiangping, Shu Lichun, Jiang Xingliang, et al. Research on initial corona characteristics of icicle to ice-covered plane model under positive polarity[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 32-36(in Chinese).
- [24] Vapnik V. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer, 1995: 244-248.
- [25] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.



胡琴

收稿日期: 2010-09-02。

作者简介:

胡琴(1981), 男, 讲师, 博士研究生, 从事高电压与绝缘技术的研究工作, E-mail: huqin@cqu.edu.cn;

舒立春(1964), 男, 教授, 博士生导师, 从事高电压与绝缘技术的研究工作, E-mail: lcsu@cqu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)