

环境湿度对空气介电常数的影响研究

李 晖¹, 胥威汀², 王涵宇², 周 成³, 张 榆⁴

(1. 四川能投发展股份有限公司, 四川 成都 611130; 2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041; 3. 国家能源集团科学技术研究院有限公司成都分公司, 四川 成都 610073; 4. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 人们越来越多关注工频电场对其生活环境产生的影响, 因此交流输电线下工频电场的测量值成为周围环境是否受污染的重要参考。实际测量中发现在高湿度地区电场强度测量值往往偏大。探究影响电场测量的因素, 通过实验和仿真发现, 空气介电常数随着湿度的增大而增大, 在环境湿度到达 75%之前增长量为 20.7%, 在环境湿度大于 75%之后增长缓慢, 但通过仿真发现空气介电常数的变化对于周围电场强度并无明显影响。支架材料电阻率随着湿度增大而减小, 且当电阻率低于 $1 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ 对电场测量有明显影响。

关键词: 环境湿度; 介电常数; 电阻率; 电场测量

Study on the influence of environmental humidity on the dielectric constant of air

LI Hui¹, XU Weiting², WANG Hanyu², ZHOU Cheng³, ZHANG Yu⁴

(1. Sichuan Energy Investment Development Co., Ltd., Chengdu 611130, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Chengdu 610041, China; 3. Chengdu Branch of National Energy Group Institute of Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610073, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: More and more people pay attention to the influence of power frequency electric field on their living environment. Therefore, the measured value of power frequency electric field under AC transmission line becomes an important reference for whether the surrounding environment is polluted. In actual measurement, it is found that the measured value of electric field intensity in high humidity area is often too large. The factors that affect electric field measurement is explored, through experiments and simulations, it is found that the dielectric constant of air increases with the increase of humidity. The increase rate is 20.7% before the ambient humidity reaches 75%, and it grows slowly after the ambient humidity is greater than 75%. However, through simulation, it is found that the change of air dielectric constant has no obvious effect on the intensity of the surrounding electric field. Scaffold material resistivity decreases with increasing humidity, and when the resistivity is less than $1 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ have obvious effects on electric field measurement.

Key words: environmental humidity; dielectric constant; resistivity; the electric field measurement

0 引言

随着国家经济的高速发展, 电网的规模也随着社会用电需求量的增大而增大, 生活线路走廊也变得随处可见。高压输电线路下的电磁辐射问题受到了社会各界的关注, 而电场强度作为磁场测

量的重要指标被广泛应用在电磁环境监测中。因此, 研究高压线路线下工频电场的测量对环境保护有着重要意义。

国家环境保护总局早在 20 世纪 90 年代就颁布了 HJ/T 24—1998《500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》^[1]。该标准结合

我国整体实际情况与当时发达国家最近的研究成果,因此该标准的提出对于评价送变电工程对电磁辐射环境影响有重要的指导意义。但是该标准尚未考虑地形、气候尤其是湿度对于工频电场强度测量的影响^[2-4]。通过大量的实践证明,工频电场的测量值随着测量环境湿度的增加而增加,该现象在环境湿度较大的地区例如四川盆地、上海地区等尤为明显。因此,开展高压架空输电线路周围电磁环境受湿度影响程度的课题研究有着重要意义。

本文为了描述环境湿度对电场强度测量的影响,将测量仪周围的空气电容和绝缘支架电阻率作为研究指标,进行量化分析。建立不同湿度下测量空气电容和绝缘支架电阻率的实验环境。建立三维的输电线与测量仪模型模拟测量中的实际环境,将实验测量的不同湿度下的空气电容和绝缘支架电阻率带入模型参数,利用有限元仿真软件求解工频电场下测量仪下实际电场强度,模拟不同湿度下测量仪周围电场强度变化规律。以不同湿度中水分子含量对空气电容的影响为桥梁,探究环境湿度对于电场测量的影响,用 COMSOL 仿真对周围电场结果进行计算,并将计算结果与实际情况进行对比与分析^[5]。

1 实验方法

1.1 电场测量仪工作原理

现阶段国内外实际环境评估与监测所采用的工频电场的测量仪主要是悬浮体场强仪。该测量仪通过测量一个孤立导体两部分间的感应电荷和工频感应电流。场强测量仪通常由探头、光纤、测试电路和显示单元等结构组成,用于空间电场的测量。实际工作中,场强仪的取样电阻与两部分的电压形成闭合回路,从回路中获得感应电流,该电流可以通过测量取样电阻的电压而获得。最后利用场强与电流的对应关系测得工频电场数值。常用的悬浮体场强仪如图 1 所示。如图 1 中 A 所示为球形探头,其半球上感应电荷有效值为 Q 且满足式(1)

$$Q = 3\pi\epsilon_0 r^2 E \quad (1)$$

式中, E 为均匀电场强度的有效值; r 为球形探头半径。

感应电流可由电子线路的电荷微分得到

$$I = \frac{dQ}{dt} = 3\pi\epsilon_0 \omega r^2 E \quad (2)$$

式中, ω 为角频率; f 为频率。

若场强仪为平行探头,则可利用式(3)

$$I = K\omega E \quad (3)$$

式中, K 为常数,与平行探头几何形状有关,由校准系数确定。

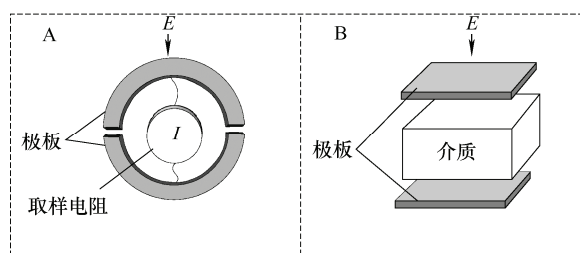


图 1 常用场强仪探头

Fig. 1 Probe of common field intensity meter

在低湿度环境中,场强仪本身具有一定的示值误差校准功能。校准条件满足环境温度在 $15 \sim 30^\circ\text{C}$,相对湿度在 $45\% \sim 75\%$ 范围内,且外部无其他电磁场干扰。校准后其示数误差不超过 $\pm 1.5\text{ dB}$,频率在 $30 \sim 2\,000\text{ Hz}$ 变化时引起的电场强度测量值变化小于等于 $\pm 3\text{ dB}$ 。在实际测量中也发现,当湿度大于 75% 时场强仪测量值误差明显增大。因此对产生该现象的原因值得定量分析。

1.2 实验平台

1.2.1 环境湿度对电容影响实验平台

为了模拟空气中水分子含量变化引起的空气电容变化,本文利用恒温恒湿箱对测量空气电容用的两块 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 锡质金属板进行预处理。恒温恒湿箱温度设为 30°C ,实验过程记录环境湿度从 68% 上升到 90% 过程中的平行板间电容值。实验装置如图 2、图 3 所示。电容测试仪正负极分别放置于上下极板旁,在连接极板前对仪器校零,

避免导线电容对空气电容值测量的影响。校零完成后开始记录空气电容数值,以 30 s 为周期完成采样,从环境湿度为 90% 采样至环境湿度为 68% 的空气电容值,每组共有 40 个采样点。本文共完成 5 次测量,取 5 次测量结果的平均值作为结果的采样值。两平板间距为 0.5 cm,平行板电容计算公式为

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi k d} \quad (4)$$

式中, S 为平行板电容器面积; k 为静电常数; d 为两极板间距; ε 为介电常数。

推导出 ε 的随温度变化的数值,并将 ε 值带入仿真模型中,求得电场强度变化关系。

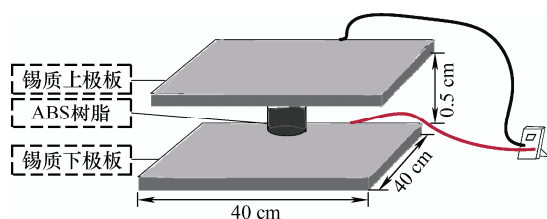


图2 电容实验装置模拟图

Fig. 2 Simulation diagram of capacitance experimental device

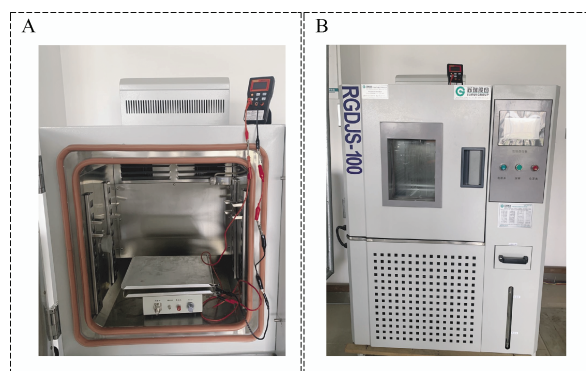


图3 电容实验装置图

Fig. 3 Capacitance test device diagram

1.2.2 环境湿度对支架材料影响实验平台

为了模拟空气中水分子含量变化引起的绝缘支架电阻变化,本文利用恒温恒湿箱分别对 ABS 树脂、高密度聚乙烯(HDPE)和聚三氟氯乙烯(PCTFE)三种材料的绝缘支架测量进行预处理。恒温恒湿箱温度设为 30 ℃,实验过程记录环境湿度

从 45% 上升到 90% 过程中的支架电阻值。实验装置如图 4 所示。被测材料接入高阻计校零完成后开始记录材料电阻数值,以 30 s 为周期完成采样,从环境湿度为 90% 采样至环境湿度为 45% 的绝缘支架电阻值,每组共有 40 个采样点。本文共完成 5 次测量,取 5 次测量结果的平均值作为结果的采样值。三种材料分别接入预设环境中完成测量。计算公式为

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad (5)$$

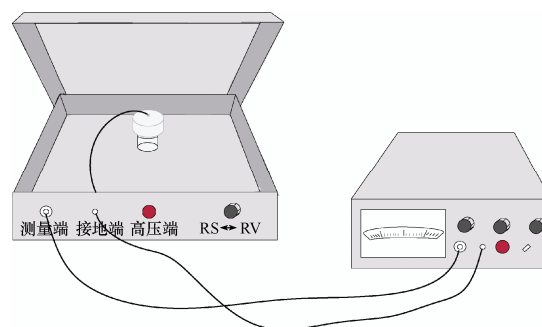


图4 电阻实验装置模拟图

Fig. 4 Simulation diagram of resistance experimental device

2 实验结果与仿真

2.1 电容随湿度的变化规律

实验中,两块面积为 40 cm × 40 cm 的平行锡质金属板放置于恒温恒湿箱中。实验前将箱内温度设定为 30 ℃,湿度设定为 68%。同时打开电容测量仪,并对其校零。待箱中温度稳定在 30 ℃,湿度为 68% 时启动实验。实验过程中将湿度设定至 90%,温度保持不变,记录湿度爬升过程中电容的变化。完整完成 5 次实验,并将实验数据取平均值,介电常数与湿度关系如图 5 所示。由图 5 可得,在环境湿度低于 75% 以前电容随环境湿度变化影响较大,当环境湿度大于 75% 时将出现曲线上升拐点,电容随环境湿度变化影响较小,随着湿度的增大,电容变化不大。在湿度上升到 75% 之前,电容增长率为 17.7%。湿度在 75%~90% 之间,电容增长率为 0.67%。

2.2 湿度对介电常数的影响

根据式(4),介电常数 ε 与电容的关系,可以计算出湿度为 68%~90% 之间介电常数的变化规

律。如图 6 所示,介电常数同电容变化曲线相似,数据拐点均在湿度为 75%处。在环境湿度小于 75%时,介电常数随湿度变化相对较大。环境湿度从 68%上升到 75%,介电常数增长率为 20.7%;环境湿度从 75%变化到 90%,介电常数相对变化缓慢,其增长率为 1.17%。

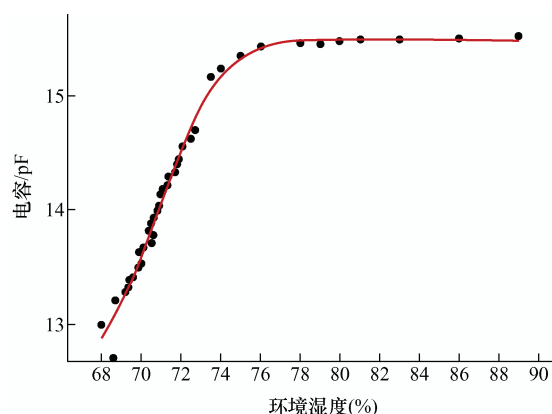


图 5 电容与环境湿度关系

Fig. 5 Relationship between capacitance and ambient humidity

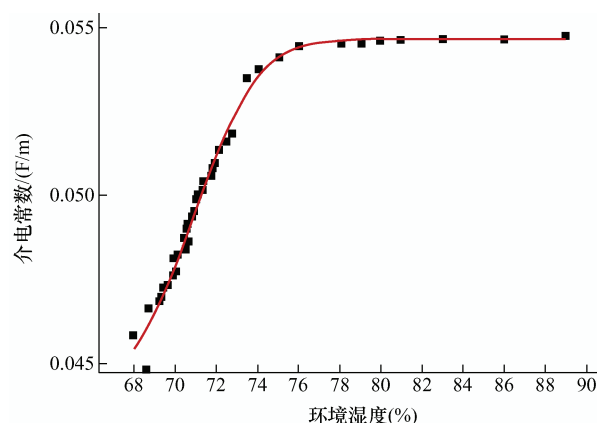


图 6 介电常数与环境湿度关系

Fig. 6 Relationship between dielectric constant and ambient humidity

2.3 电阻率随湿度的变化规律

实验中,分别将高度为 3 cm,截面积为 3 cm² 的 ABS 树脂、高密度聚乙烯(HDPE)和聚三氟氯乙烯(PCTFE)三种材料的绝缘支架放置于恒温恒湿箱中。实验前将箱内温度设定为 30 ℃,湿度设定为 45%。同时打开高阻计,并对其校零。待箱中温度稳定在 30 ℃,湿度为 45%时启动实验。实

验过程中将湿度设定至 90%,温度保持不变,记录湿度爬升过程中电阻的变化。完整完成 5 次实验,并将实验数据取平均值,聚三氟氯乙烯(PCTFE)、高密度聚乙烯(HDPE)和 ABS 树脂三种材料电阻与湿度关系分别如图 7~图 9 所示。本文所选取的绝缘支架材料电阻率整体随环境湿度增大而减小,且到达一定湿度时曲线会出现拐点,其中聚三氟氯乙烯(PCTFE)电阻率随湿度下降最快。当聚三氟氯乙烯(PCTFE)、高密度聚乙烯(HDPE)和 ABS 树脂所处环境湿度分别为 80%、50%和 70%时,电阻率下降至一开始的 10%。三种材料电阻率下降为原来的 10%后,其电阻率基本保持不变。

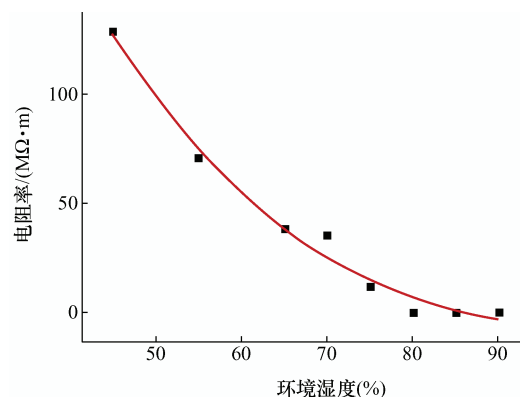


图 7 PCTFE 材料电阻率与湿度的关系

Fig. 7 Relationship between resistivity and humidity of PCTFE materials

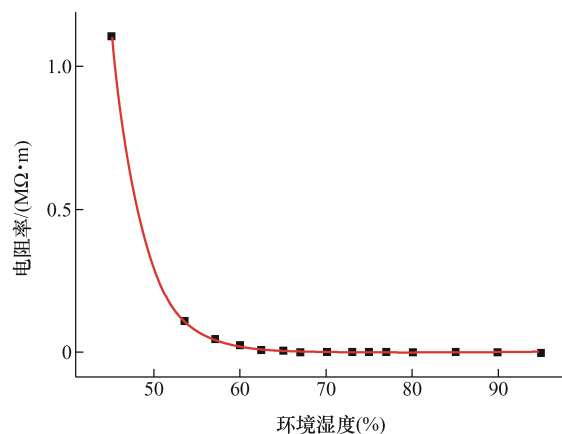


图 8 HDPE 材料电阻率与湿度的关系

Fig. 8 Relationship between resistivity and humidity of HDPE material

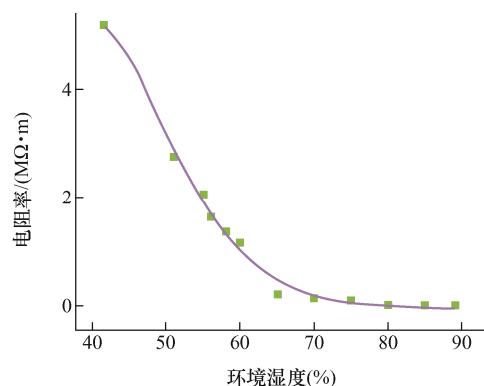


图9 ABS材料电阻率与湿度的关系

Fig. 9 Relationship between resistivity and humidity of ABS material

2.4 电场强度仿真模拟

为了最大限度还原电场强度测量现场, 本文利用 COMSOL 软件搭建了三维输电线与测量仪模型, 计算出不同空气介电常数和不同支架材料下输电线下方的电场分布云图。模型结构从上至下依次为圆柱输电线, 场强仪放于输电线下方, 绝缘支架支撑, 最下方的小圆柱为地面, 整体被无限元域包裹, 如图 10 所示。

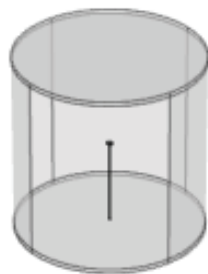


图10 COMSOL 结构模型

Fig. 10 The structure model of COMSOL

2.4.1 空气介电常数变化对电场强度的影响

本文分别选取湿度为 70%、80%和 90%下的电场强度测量情况, 电场分布云图无明显变化。如图 11 所示。根据数据表格, 湿度从 68%上升至 90%, 电场强度没有变化, 在场强测量仪的测量误差范围内。因此空气介电常数的改变对电场测量无明显影响。

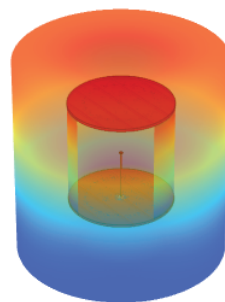


图11 电场分布云图

Fig. 11 Electric field distribution cloud map

2.4.2 绝缘支架电阻率变化对电场强度影响

本文分别将湿度为 45%~90%时 ABS 树脂、高密度聚乙烯(HDPE)和聚三氟氯乙烯(PCTFE)三种材料电阻率带入仿真, 得电阻率与电场强度的变化关系如图 12 所示。在电阻率小于 $1 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ 时, 电场强度随电阻率的增大而减小, 且减小率为 0.32%。当材料电阻率大于 $1 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ 时, 电场强度几乎不受电阻率变化影响。因此材料电阻率越大, 且大于 $1 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ 对电场测量影响越小。

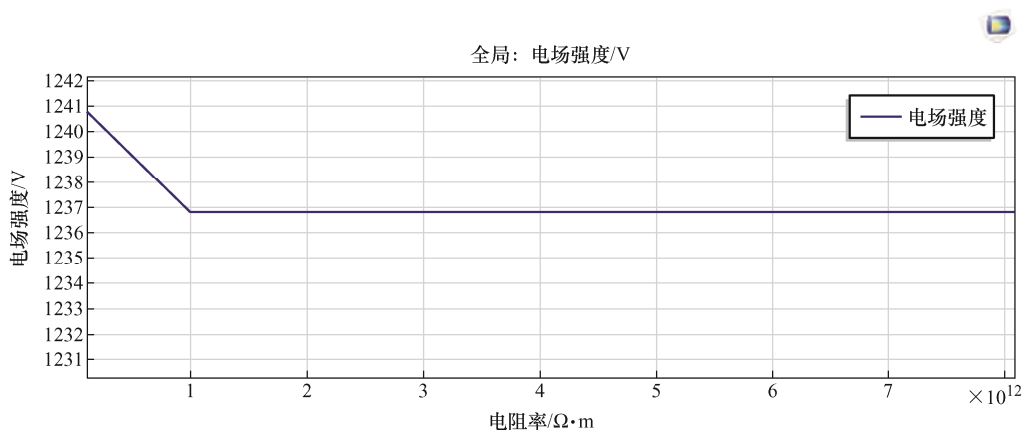


图12 材料电阻率与电场强度关系

Fig. 12 Relation between material resistivity and electric field intensity

3 结果讨论与分析

3.1 线路工频电场分布与湿度无关

当研究输电线下的工频电场分布问题，线路和大地整体可以近似看作一个电容。当线路平行于大地架设时，该电容数值只与线路离地高度、研究区域线路长度以及两者间空间介质有关。在无风稳定条件下，线路—大地电容可定义为

$$C = \frac{Q}{U} \quad (5)$$

式中， Q 为来自导线表面的电荷量； U 为线路电压。

当线路与大地之间空气湿度增加，两者间的介质将由干燥空气变为介电常数为 ε 的湿润空气介电常数。其电容 C 变化为

$$C = \varepsilon_r C_0 \quad (6)$$

式中， ε_r 为空间介质相对介电常数； C_0 为绝对真空电容。

由电场强度定义式可知，在空间中某点 $M(x,y,z)$ 由线路上带电电荷产生的场强 $E(x,y,z)$ 为

$$E(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\varepsilon} d(x,y,z) \quad (7)$$

式中， Q 为导线表面电荷量； $d(x,y,z)$ 为点电荷到 M 点的距离函数。

将上述三个公式整合可得

$$E(x,y,z) = \frac{C_0 \varepsilon_r U}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r} d(x,y,z) = \frac{C_0 U}{2\pi \varepsilon_0} d(x,y,z) \quad (8)$$

由式(8)可知，有限长输电线在空间中某点产生的空间电场只和该点的空间位置有关，与空间介质本身无关。

理论而言，工频交流输电线下方的电场强度与湿度没有直接的联系。空气介电常数随着湿度增加对于电场的测量并无明显影响，因此可以排除空气介电常数作为主要因素对于场强测量的干扰。

3.2 空气相对湿度与介电常数的关系

空气内部水蒸气含量通常用空气相对湿度 RH 作为衡量标准，空气相对湿度 RH 计算公式为

$$RH = \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^*} \right) PT \quad (9)$$

式中， P_{H_2O} 为空气实际的水汽压； $P_{H_2O}^*$ 为同温度同压力下饱和空气中的水汽压。

饱和水汽压与温度有一定的函数关系，因此当在一定的环境温度下，饱和水汽压为定量常数^[6]。

空气相对介电常数是空气成分偏压的函数，其函数关系为

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{N_A}{RT} \frac{1}{3\varepsilon_0} \sum P_i a_i \quad (10)$$

式中， a_i 为空气中各种物质的极化强度。

若将水汽压单独罗列则式(10)可表示为

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{N_A}{RT} \frac{1}{\varepsilon_0} (P_{H_2O} \alpha_{H_2O} + \sum P_j \alpha_j) \quad (11)$$

根据式(11)可解得任意环境压强与温度下水汽压 P_{H_2O} 与 ε_r 的对应关系。实际中通过测量水汽压可得到空气相对介电常数，其遵循公式为

$$\frac{dP_{H_2O}}{d\varepsilon_r} = \frac{9RT\varepsilon_0}{N_A \alpha_{H_2O} (\varepsilon_r + 2)^2} \quad (12)$$

当 ε_r 呈现很小的变化趋势时，式(12)可近似变形为

$$\Delta P_{H_2O} = \frac{9RT\varepsilon_0}{N_A \alpha_{H_2O} (\varepsilon_r + 2)^2} \Delta \varepsilon_r \quad (13)$$

将式(12)代入式(9)中，可得不同大气压强和温度下，空气相对湿度变化量与空气相对介电常数变化量的关系为

$$\Delta RH = \frac{9RT\varepsilon_0}{P_{H_2O}^* N_A \alpha_{H_2O} (\varepsilon_r + 2)^2} \Delta \varepsilon_r \quad (14)$$

因为介电常数 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ，将其带入式(14)可得

$$\Delta RH = \frac{9RT}{P_{H_2O}^* N_A \alpha_{H_2O} (\varepsilon_r + 2)^2} \Delta \varepsilon \quad (15)$$

令 $\beta = \frac{9RT}{P_{H_2O}^* N_A \alpha_{H_2O} (\varepsilon_r + 2)^2}$ ，则式(15)可表示为

$$\Delta RH = \beta \Delta \varepsilon \quad (16)$$

式中， β 为同一温度和压强下的常数。

式(12)则为相对湿度与介电常数的变化关系式。

3.3 空气相对湿度与绝缘支架电阻率的关系

实际生产应用中,场强仪所使用绝缘支架是一种存在极性基团的高分子材料。由于极性基团的存在,当周围大气压与绝缘支架材料存在一定分压差,水分子会渗透入材料中。水分子在分子材料中沿其浓度梯度方向传递。根据费克二定律水分子的扩散情况可描述为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (17)$$

式中, D 为扩散系数; C 为水分子浓度; x 为部位参数。

由上述方程可知水分子浓度越大,其在绝缘材料中扩散越快。水分子大量浸入绝缘材料中,导致导电离子增多,这些离子间产生的较强运动导致绝缘层电流增加,从而降低了绝缘电阻系数,最终导致绝缘材料电阻率减小^[7]。

4 结束语

通过实验完成对不同湿度下空气介电常数的测量。通过理论和实验可得空气介电常数随湿度的增大而增大。在环境湿度为 75%之前介电常数增大较为明显;在环境湿度为 75%时出现拐点,增加趋势趋于平缓。

通过实验和仿真得出 ABS 树脂、高密度聚乙烯(HDPE)和聚三氟氯乙烯(PCTFE)等材料作为绝缘支架,其电阻率随湿度增大而减小。

环境湿度本身对工频交流输电线路下方电场强度无直接影响。环境湿度可以改变空气介电常数,但是空气介电常数的改变对于电场测量并无实际影响。当空气介电常数从 0.045(F/m)上升为 0.055(F/m)时,电场强度变化率仅为 0.001%,因此造成实际测量值偏大的主要因素

并非空气介电常数的变化。将变化的支架电阻率带入仿真计算,得出电场强度受支架材料电阻率影响较大,在电阻率小于 1 MΩ·m 时,电场强度随电阻率的增大而减小,且减小率为 0.32%。当材料电阻率大于 1 MΩ·m 时,电场强度几乎不受电阻率变化影响。因此材料电阻率越大,对电场测量影响越小。**EA**

参考文献

- [1] 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范: HJ/T 24—1998[S].
- [2] 许杨, 张小青, 杨大晟. 高压送电线路工频电磁环境[J]. 电力学报, 2007, 22(1): 9-14.
- [3] BABA Y, ISHII M. Numerical electromagnetic field analysis on measuring methods of tower surge impedance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 630-635.
- [4] ISHII M, BABA Y. Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 483-488.
- [5] 工频电场测量: GB/T 12720—1991[S].
- [6] 王振会, 黄兴友, 马舒庆. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [7] 杨宏宇. 城市 XLPE 电缆绝缘状态在线监测系统及应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.

作者简介:

李晖(1969—),男,工程师,从事电力系统监测技术研究。

(收稿日期: 2021-01-13)



李 晖