

XLPE 电力电缆介质引发水树机理的研究

Study on Mechanism of Water Tree Caused in XLPE Power Cable Dielectric

袁 栓¹, 冯 江¹, 朱海刚¹, 罗俊华², 阎孟昆²

(1. 上海市东供电公司, 上海 200122; 2. 国家电力公司武汉高压研究所, 武汉 430074)

摘 要 分析了 XLPE 电力电缆介质水树枝劣化的机理, 在 Maxwell 极化应力理论的基础上建立了水树力学模型, 应用电场有限元数值计算方法分析 XLPE 介质因局部电场畸变导致的劣化过程并通过试验证明: XLPE 介质在电场作用下内部水分凝结、热膨胀及介质电致伸缩等导致介质疲劳断裂形成微观裂纹而引发水树枝; 水树枝由微观裂纹和凝结水组成且沿电场方向发展。

Abstract Water Tree degradation in XLPE dielectric is an earlier period aging phenomenon during operation of XLPE power cable. A dynamic model of water tree with its electric field numerical calculation is proposed in this paper to describe and analyze the mechanism of water tree caused in XLPE power cable dielectric.

关键词 XLPE 电缆 水树 机理

Key words XLPE cable water tree mechanism

中图分类号 TM247 **文献标识码** A

0 引 言

介质水树枝劣化是 XLPE 电力电缆运行中最典型的早期老化现象, 本文以应变论为基础建立水树力学模型, 通过电场有限元数值计算的方法分析介质局部畸变电场, 以研究水树枝的引发机理。

1 水分迁移动力学

有机介质均具吸湿性, 并有其物理过程(如表面吸附、内部吸收和分子渗透等)和化学过程(如对介质高分子水解、对某些与台剂溶解或被水分抽提等)。水分子体积很小(0.25 nm, 小于介质高分子的 1/100), 极性很强(偶极矩为 1.85 aC·m), 与介质高分子作用强烈, 尤其是介质中部分极性基团如羟基、羰基和酯基对水分子特别敏感, 容易产生自游离, 故水分因界面效应游离介质高分子中微量可溶性配合剂而容易地向介质内部迁移和扩散。同时水蒸气分子在空气中作热运动而不断地与介质表面高分子发生碰撞, 并藉助介质分子链段的热运动而直接进入介质内部。

热运动水分子由于 XLPE 介质与大气之间的局部压力差而沿电缆径向向介质内部迁移^[1]。介质中水的体积质量 $\rho = h\rho_0$, 式中, ρ_0 为水蒸气压力, Pa; h 为介质溶解度系数, 通常 $h(\text{XLPE}) \approx 0.1 \sim 1 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{Pa})$ 。水分子进入介质内部后继续沿其质量分数梯度值降低的方向(x)迁移和扩散, 在 dt 时间

和 S 截面内, 水分子扩散至的 XLPE 介质中水质量 m 的增量 $dm = -Dh(dp/dx)Sdt$, 式中, D 为扩散系数, cm^2/s , 它与温度的关系为 $D = D_0 \exp(-\Delta E_a/RT)$, 其中, $D_0 = 3.3 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$; 扩散活化能 $\Delta E_a = 55.68 \text{ kJ}$; R 为气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, $\Delta E_a/R = 6700 \text{ K}$; T 为绝对温度。

由此得到水分子在 XLPE 介质中的扩散速度 $dm/dt = -D_0 \exp(-\Delta E_a/RT)Sh(dp/dx)$ 。

水分在 XLPE 介质中的迁移和扩散与其化学势密切相关。起始时因介质中溶解水分的化学势 μ_{di} 与介质缺陷中水分的化学势 μ_{de} 及外界环境中水分的化学势 μ_0 不相等(热力学平衡条件不能满足), 故水分迁移和扩散, 直至 $\mu_{di} = \mu_{de} = \mu_0$ (即达到化学势平衡)时水分停止迁移和扩散。

2 水树枝引发机理

外施电场将改变扩散活化能 ΔE 和各相水分子化学势, 介质中的水分在电场集中处凝结成液态水以保持能量最小状态。当场强 E 不变($dE=0$)时, 水分的饱和蒸气压 p_s 与 E 的关系符合有克拉柏龙-克劳修斯方程^[2,3]:

$$p_s = p_0 \exp(-AE^2) \exp(-\Delta H/RT)$$

式中, p_0 为常数; A 为与气态水介电常数 ϵ_g 、液态水介电常数 ϵ_l 及 $\epsilon(\text{XLPE})$ 相关的常数; $\Delta H = (S_g - S_l)T$, S_g 为气态水摩尔熵, S_l 为液态水摩尔熵; 气体常数 $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度。在电场 E 的作用下, XLPE 介质的缺陷(杂质或气隙)中液态水饱和蒸气压下降并凝结成液态。同时, 电场 E 改变了各相水分的化学势而破坏它们的平衡, 使得外界水分继续向介质内部迁移和扩散。介质中各相水分子化学势变化幅度与电场相关, 符合吉布斯方程。

不论是晶体还是无定形介质, 在电场的作用下均会由于诱导极化产生 Maxwell 应力而引起介质微观形变、微观气隙和次微观气隙自由体积合并。Maxwell 应力大小正比于场强幅值变化, 迫使介质机械疲劳而开裂形成细小裂纹, 外界水分迁移和扩散至细小裂纹中凝结, 即电致伸缩效应。介质形变和开裂与极化强度成正比, 与外施电场极性无关。图 1 为充气气隙电致伸缩模型。

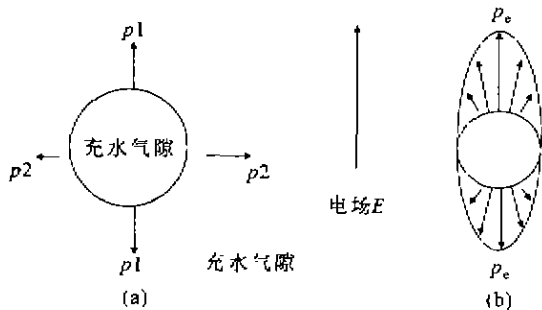


图1 电致伸缩模型

图1(a)中作用于充水气隙上的 Maxwell 应力 p_1 和 p_2 分别为:

$$p_1 = \frac{\epsilon_0}{6} \left(\frac{3\epsilon(XLPE)}{\epsilon_1 + 2\epsilon(XLPE)} \right) 3(\epsilon_1 + \epsilon(XLPE)) \cdot \epsilon_1 / \epsilon(XLPE) + (\epsilon_1 - 1)(\epsilon(XLPE) + 2) \cdot \epsilon_1 / \epsilon(XLPE) - 3(\epsilon_1 - 1.8)E^2$$

$$p_2 = \frac{\epsilon_0}{6} \left(\frac{3\epsilon(XLPE)}{\epsilon_1 + 2\epsilon(XLPE)} \right) ((\epsilon(XLPE) - 1) \cdot (\epsilon_1 + 2) - 3(\epsilon(XLPE) - 1.8))E^2$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数; $p_1/p_2 = 2.24 \times 10^{-4}$, 故 p_2 可忽略。计及界面表面张力抗拒电致伸缩, 作用在充水气隙上的净应力 p_e (见图1(b)) 为

$$p_e = 1.14 \times 10^{-10} E^2 - 0.06/r$$

式中 r 为充水气隙半径, p_e 的方向是平行于电力线且由气隙内向外方向。介质因其中的气隙 G 受 p_e 的作用疲劳断链开裂, 同时, 气隙水分加热膨胀促使介质在区域 a 内形成次微观气隙 g 。水分膨胀收缩和电致伸缩的反复作用可产生一系列的次微观气隙并形成沿电力线方向排列的微观气隙链, 次微观气隙链发展至连通的纤维状通道并含有足够的凝结水时即形成水树枝 (见图2)。

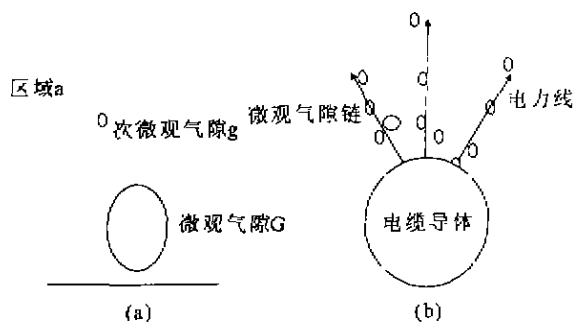


图2 水树引发机理

因 $\epsilon_1 \gg \epsilon(XLPE)$, 介质内部电场分布严重畸变, 水树枝微观裂纹尖端电场大幅增强使得次微观气隙产生和汇聚加剧, 水树枝不断沿电场方向延伸形成水树区。用有限元数值法计算 (图2(b)) 水树枝模型的电场分布^[4]时, 因模型呈轴对称, 只需计算模型的 1/4 且微观气隙内和微观纤维状通道内的水按去离

子水的电导率 $\gamma_1 = 5.5 \times 10^{-6} S/m$ 取值, 未老化 XLPE 介质的 $\tan\delta, \epsilon_1, \epsilon(XLPE)$ 分别取 $5 \times 10^{-3}, 81$ 和 2.3。为获得足够的精度, 极不均匀电场处网格的划分十分密集, 在每一个结点求解如下方程组:

$$\begin{cases} \nabla(\gamma_m \nabla \varphi + j\omega\epsilon_0\epsilon_r \nabla \varphi) = 0 \\ E = -\nabla(\varphi) \end{cases}$$

式中, γ_m, ϵ_r 分别为材料的电导率和相对介电常数; φ 为电势。

计算结果表明: 单一微观气隙端部靠近电极处的电场增强为 $(3.9 \sim 6.7)E$; 微观气隙汇聚形成微观裂纹并充满凝结水时, 微观裂纹尖端的电场增至 $11.2E$ 。

3 试验验证

XLPE 电力电缆介质切片染色后在光学显微镜下可观察水树枝形态。水分迁移和扩散至介质内部杂质 (电场畸变) 处凝结形成的水晕环见图3(a); 因



(a) 杂质处水晕环 (b) 产生于杂质处的领结形水树枝

图3 在光学显微镜下观察到的水树枝形态

电致伸缩和水分热膨胀使得介质产生微观裂纹而形成水树枝, 见图3(b)。树枝状通道的直径范围约 $5 \sim 50 \mu m$ 。为了验证水树枝由微观裂纹和凝结水组成, 将存在水树枝的 XLPE 介质经过干燥处理后切片染色光学显微镜下观察没有发现水树枝形态; 切片在扫描电子显微镜下却发现连续的直径约 $0.1 \sim 5 \mu m$ 裂纹, 见图4(a); 该切片经水煮数小时后再置于光学显微镜下观察, 能够观察到水树枝形态, 见图4(b)。试验证实水树枝是由微观裂纹和凝结水组



(a) 水树枝扫描电镜照片 (b) 水树枝光学显微镜照片

图4 水树枝微观结构

(下转第12页)

3 一回运行另一回零起升压时的情况

二滩电站给洪一陈 500 kV 线路零起升压试验时洪龙同杆双回线路必须腾出一回来参与此试验,另一回仍照常运行。零起升压时使用单独电源(二滩电厂 4 号机)和已接入系统的二滩其它机组不相连。

升压过程中发现所试线路沿线几个站的监视仪表读数不断地忽高忽低变化,记录波形具有明显的拍频振荡,图 3 为慢扫描的波形图,记录二滩母线平均电压 17.7 kV 时的情况,拍频振荡周期约 10 s,相当于 f_1 和 f_2 之差(即 0.1 Hz)。

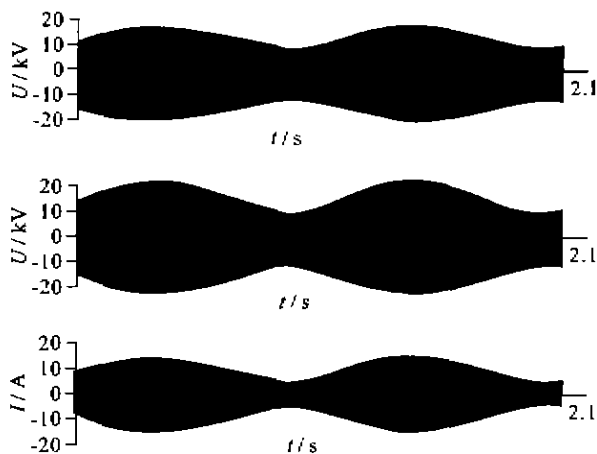


图 3 二滩,洪沟电压及二滩电流波形图

此拍频振荡也系洪龙同杆双回线路之间互相感应造成。零起升压使用的单独电源的角频率 ω_1 和系统的角频率 ω_2 虽然比较接近,但总有差异,感应作用使零起升压线路上的电压 $U = U_1 \sin \omega_1 t + U_2 \sin \omega_2 t$, U_2 是一回对二回的感应电压,因而产生拍频振荡。

本文研究的洪龙 500 kV 带高抗同杆双回线路

(上接第 9 页)

成,且沿电场方向发展,与理论分析相吻合。

4 结 论

a. XLPE 介质在电场作用下内部水分凝结、热膨胀及介质电致伸缩等导致介质疲劳断裂形成微观裂纹而引发水树枝。

b. 水树枝由微观裂纹和凝结水组成且沿电场方向发展。

参 考 文 献

1 陈季丹,刘于玉. 电介质物理学,北京:机械工业出版社,

间的感应作用和对感应电压、电流的分析,均在二滩电站外送 500 kV 输电系统启动调试得到验证,实测结果和研究是相吻合的。

4 结 论

a. 带高抗的同杆双回线间的稳态和瞬态耦合作用明显强于不带高抗的同杆双回线路。

b. 带高抗的同杆双回线路之间静电耦合电压可能超过标准值,对接地开关提出了更高的要求。

c. 一回线路操作(切空线),另一回停运的未接地的线路上可以感应产生高达 500 kV 的拍频振荡电压,必须予以注意。

d. 同杆双回线路中一回接入系统,另一回零起升压时,耦合作用使后者产生明显的拍频振荡电流和电压。

致谢 本研究曾得到修木洪、郑正圻教高工帮助,在此致谢。

参 考 文 献

- 1 EPRI. Transmission line reference book 345 kV and above (second Edition). EPRI, 1982
- 2 陈亚伦等. 伊敏—冯屯 500 kV 同塔双回线路不平衡度、感应电流及潜供电流研究. 电网技术,1995,(6):13
- 3 李斌等. 关于同杆双回线路检修回路中接地开关开断工况的研究. 电网技术,1995,(1):42

(收稿日期 2001-12-15)

- 张文亮 1954 年生,硕士,教授级高工,中国电机工程学会高电压专委会主任,从事高电压技术研究。
- 谷定燮 1941 年生,教授级高工,副总工,全国绝缘配合标准分会副主任,从事过电压和绝缘配合研究。
- 方文弟 教授级高工,副总工,中国电机工程学会高压专委会委员。
- 韩晓育 高工,博士,从事超高压输变电和电力系统管理和研究。

社,1982

- 2 罗俊华,袁淳智, XLPE 电力电缆在直流电场下介质树枝状劣化特性的研究. 高电压技术,1993,19(1):41
- 3 Hvidsten S et al. Understanding water treeing mechanisms in the development of diagnostic test methods. IEEE Trans on D & EI, 1998, 5(5):754
- 4 陈守直,罗俊华等. 电缆附件电场有限元计算方法. 高电压技术,1996,22(3):11

(收稿日期 2001-10-19)

袁 焱 1956 年生,工程师,从事高电压技术管理工作,电话:(021) 5878741E。

罗俊华 1961 年生,西安交通大学博士研究生,从事电力电缆研究。