

引用格式:张牧桑,冯子阳,汤昕,等.连续雷电冲击下杆塔导电混凝土基础的热效应分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):249-254.

Citation:ZHANG Musang,FENG Ziyang,TANG Xin,et al.Thermal effect analysis of tower conductive concrete foundation under continuous lightning strike[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(2):249-254.

# 连续雷电冲击下杆塔导电混凝土基础的热效应分析

张牧桑<sup>1</sup>,冯子阳<sup>1</sup>,汤昕<sup>2</sup>,周力行<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410114;2.长沙电力职业技术学院电网技术系,湖南长沙 410131)

**摘要:**导电混凝土做输电线路杆塔基础接地已在国内多个工程中得到试点应用。但其连续雷电冲击作用下杆塔导电混凝土基础的温升特性目前尚需理论分析与试验研究。为此,考虑连续雷电冲击下土壤电离的火花效应及其累积效应,建立杆塔导电混凝土基础散流的 ATP-EMTP 仿真模型,计算导电混凝土的杆塔基础在受到连续雷电冲击作用时的热稳定情况,为工程实际提供理论参考。结果表明:在雷电冲击下,导电混凝土基础的热效应改变了周围土壤的盐碱度和含水量,提高周围土壤的电阻率,使得接地电阻相较于雷击前提高了 6.56%;当连续雷电冲击次数  $n \leq 2$  时,导电混凝土基础上产生的温升  $\Delta t = 287.06 < 300$  °C,此时杆塔导电混凝土基础是安全稳定的。当  $n \geq 3$  时, $\Delta t > 300$  °C,导电混凝土基础的结构存在被破坏的可能,有可能给电力系统稳定运行带来安全风险。因此,在工程实际中采用导电混凝土基础作为杆塔接地装置,应当尽可能减小导电混凝土基础周围土壤的电阻率,增强其散热能力。

**关键词:**连续雷电冲击;导电混凝土;热效应;ATP-EMTP

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.028 中图分类号:TM862 文章编号:1673-9140(2024)02-0249-06

## Thermal effect analysis of tower conductive concrete foundation under continuous lightning strike

ZHANG Musang<sup>1</sup>, FENG Ziyang<sup>1</sup>, TANG Xin<sup>2</sup>, ZHOU Lixing<sup>1</sup>

(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Department of Power Grid Technology, Changsha Electric Power Technical College, Changsha 410131, China)

**Abstract:** Conductive concrete applied as power transmission tower foundation grounding has been piloted in many domestic engineering projects. However, the temperature rise characteristics of conductive concrete foundation under continuous lightning impact still need further theoretical analysis and experimental research. In this paper, the spark effect of soil ionization under continuous lightning impact and its cumulative effect are considered. An ATP-EMTP simulation model for the dispersion effect of conductive concrete tower foundation is established. The thermal stability of the conductive concrete foundation suffering continuous lightning strike is calculated, which provides theoretical reference for engineering practice. The results show that the thermal effect of conductive concrete foundation changes the salinity and water content of the surrounding soil under lightning impulse. Thus, the resistivity of the surrounding soil is improved, which results in 6.56% increase of the grounding resistance. When the number of continuous lightning impulse  $n \leq 2$ , the temperature rise of conductive concrete foundation  $\Delta t = 287.06 < 300$  °C, the conductive concrete foundation of tower is safe and stable. Once  $n \geq 3$ , the temperature rise  $\Delta t > 300$  °C, the structure of conductive concrete foundation may be destructed, which may bring safety risks to the stable operation of power system. Therefore, in actual engineering applying conductive concrete foundation grounding, the resistivity of the soil around the foundation

收稿日期:2021-12-10;修回日期:2022-04-22

基金项目:国家自然科学基金面上基金(52177015)

通信作者:周力行(1962—),男,博士,教授,主要从事电气设备绝缘监测与故障诊断、电力系统防雷接地等研究;E-mail:1557278935@qq.com

should be reduced to improve the dissipative heat capacity.

**Key words:** continuous lightning strike; conductive concrete; thermal effect; ATP-EMTP

导电混凝土由普通混凝土添加一定量的导电组分材料组成。导电组分材料不仅赋予了混凝土导电性<sup>[1-2]</sup>,而且使混凝土在保有结构材料特点的同时具有有机敏特性(压敏性、弯敏性和温敏性)。导电混凝土目前在电热除冰化雪、电力设备接地工程等方面得到广泛应用,如在冰雪覆盖的路面铺设导电混凝土板通电融雪、以导电混凝土作为基础接地等<sup>[3]</sup>。输电线路杆塔采用导电混凝土做基础接地,通过降低接地电极表面与土壤的接触电阻,达到降低接地电阻的目的<sup>[4]</sup>。该方法具有接地电阻小、稳定及使用寿命长等优点,目前在一些土壤电阻率较低地区的线路得到应用。然而,由于导电混凝土比普通混凝土升温更快,对于钢筋配合导电混凝土作为基础接地结构来说,当钢筋的温度达到350~400℃时混凝土和钢筋的致密结构将被破坏<sup>[5]</sup>。因此,采用导电混凝土做杆塔基础接地,必须考虑雷电冲击下杆塔基础的温升效应。

现有杆塔接地系统雷电冲击特性研究,通常只考虑单脉冲雷电冲击下的散流特性和最大温升,没有考虑连续雷电冲击下土壤电离后的恢复过程及其对后续冲击的影响。但观测和研究表明:自然界雷电存在一次回击多次放电现象,即连续雷电冲击,其脉冲间隔大约为0.1~500 ms;且一次雷电冲击主放电往往还伴随着多个连续的余辉放电过程,热量在很短的时间内很难排出去,整个雷电冲击过程中应当充分考虑热量的累积效应。因此,仅以单次雷电冲击为基础设计的接地系统在实际运行中必然存在缺陷。试运行阶段的导电混凝土基础在连续雷电冲击时可能出现未预知的问题,给输电线路运行带来安全隐患。

本文利用ATP-EMTP软件建立连续雷电冲击下导电混凝土基础仿真模型,对单次雷电冲击和多次雷电冲击下导电混凝土基础的温升进行比较与分析,可为导电混凝土基础在实际工程的应用提供理论依据和参考。

## 1 连续雷电冲击下导电混凝土基础仿真模型

### 1.1 连续冲击雷电流模型

统计表明,回击地闪总数中90%以上是负极性地闪,其中44%负极性地闪具有多次回击<sup>[6]</sup>。连续

回击地闪的间隔时间短、电流幅值高,但大于40 kA的雷电流幅值约占35%。文献[6]对连续回击地闪的雷电流强度进行了测量,首次与后续回击的雷电流幅值分别为40~100、0~40 kA,其时间间隔为0~1 s,相邻回击之间的时间间隔为0~500 ms。因此,本文在仿真计算中的首次与后续雷击的雷电流幅值分别取为40、10 kA;根据文献[7],雷电流的波形采用 $(2.6/50)\mu\text{s}$ 。为降低计算复杂度,连续回击的时间间隔采用等间隔分布,后续雷电流幅值均采用同一幅值。

雷电流仿真模型采用Heidler模型:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{(t/\tau_1)^n + 1} e^{-t/\tau_2} \quad (1)$$

式中, $i(t)$ 为雷电流; $I_0$ 为雷电流峰值; $\tau_1$ 为波前时间常数; $\tau_2$ 为波尾时间常数; $n$ 为凹陷因子; $\eta$ 为峰值校正因子。

结合上文对雷电流参数的设定,在ATP-Draw中选择Heidler模型,首次与后续雷击脉冲间的时间间隔设定为30 ms,后续雷击间的时间间隔设定为40 ms,其波形如图1所示。

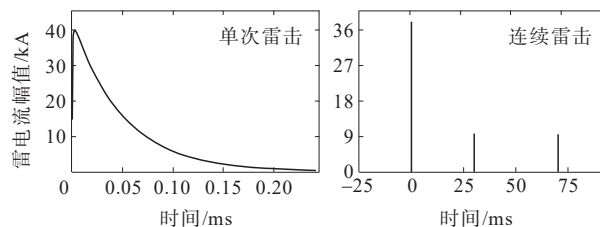


图1 雷电流仿真波形

Figure 1 Lightning current simulation waveform

### 1.2 导电混凝土基础在连续回击下产热计算

当雷电流经导电混凝土基础散流时,所造成的能量损失几乎全部以热能的形式体现在接地装置的温升中, $\Delta t$ 时间内总热量<sup>[8]</sup>为

$$Q = R_E \int_0^{\Delta t} I_E^2 dt + R_F \int_0^{\Delta t} I_F^2 dt \quad (2)$$

式中, $R_E$ 为导电混凝土基础电阻; $R_F$ 为散流通道的土壤电阻; $I_E$ 为流经导电混凝土的雷电流; $I_F$ 为向导电混凝土周围土壤逸散的雷电流。

雷电流散流过程中产生的温升为

$$\Delta T = \frac{Q_E}{m_E c_E} + \frac{Q_F}{m_F c_F} \quad (3)$$

式中,  $m_E$  为导电混凝土基础质量;  $m_F$  为散流通道土壤质量;  $c_E$  为导电混凝土基础的比热容;  $c_F$  为散流通道土壤比热容。

因为  $I_E \gg I_F$ , 且雷电流的散流通道形成机理具有很大的随机性, 因此, 只考虑雷电流流经导电混凝土基础产生的热量对整体接地装置温升的影响:

$$\Delta T = Q_E / m_E c_E \quad (4)$$

通过分析雷电流注入导电混凝土基础过程可知, 雷电流的幅值与波形在导电混凝土基础各处皆不相同, 运用 Matlab 软件仿真模型进行仿真计算, 计算流程如图 2 所示。

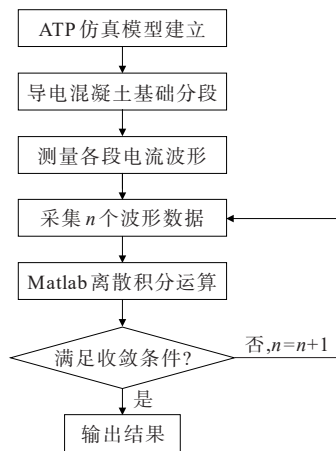


图 2 产热计算流程

Figure 2 Heat generation calculation flow chart

### 1.3 导电混凝土基础仿真计算模型

建立集中参数电路模型以对导电混凝土基础进行描述, 对单个导电混凝土基础进行剖分, 每段基础的电阻值<sup>[9]</sup>为

$$R_i = \rho l / S \quad (5)$$

式中,  $R_i$  为剖分后第  $i$  段基础的电阻值,  $\Omega$ ;  $\rho$  为导电混凝土的电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $l$  为第  $i$  段基础长度,  $m$ ;  $S$  为导电混凝土基础横截面的面积,  $m^2$ 。

每段基础上的自感系数为

$$L_i = \frac{\mu l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right) \quad (6)$$

式中,  $L_i$  为剖分后第  $i$  段基础的自感系数,  $\mu H$ ;  $\mu$  为导电混凝土的磁导率,  $H/m$ ;  $r$  为基础的真实半径,  $m$ 。

单位长度导电混凝土基础对地电导公式为

$$G_i = \frac{2\pi}{\rho [\ln(l_i^2 / 2hr_i) - 0.61]} \quad (7)$$

式中,  $G_i$  为第  $i$  段基础单位长度的对地电导;  $l_i$  为导电混凝土基础第  $i$  段的长度;  $\rho$  为土壤电阻率;  $h$  为导电混凝土基础埋深;  $r_i$  为第  $i$  段的等值半径。

各段导电混凝土基础单位长度对无穷远零位面的电容为

$$C_i = \epsilon \rho G_i \quad (8)$$

式中,  $\epsilon$  为土壤的介电系数, 在实用范围内  $\epsilon = 9 \times 8.86 \times 10^{-12}$ 。

### 1.4 仿真简化计算条件

由于实际连续雷电过程涉及导电混凝土基础的物化性质与成分的改变, 且雷电流散流通道的形状具有很大的随机性, 直接对连续雷击下的导电混凝土基础进行仿真计算, 不仅模型复杂而且大大提高了计算的复杂度, 不利于工程实际的分析。因此, 对连续雷击下的导电混凝土仿真进行简化计算, 以适应于导电混凝土在连续雷击下仿真计算的需要。连续雷击下导电混凝土基础 ATP 仿真模型如图 3 所示。

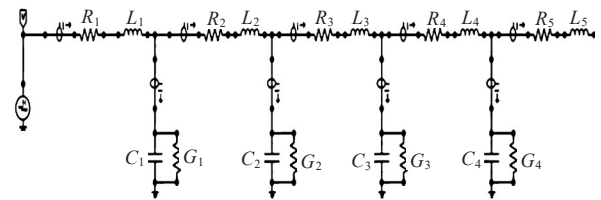


图 3 连续雷击下导电混凝土基础 ATP 仿真模型

Figure 3 ATP simulation model of conductive concrete foundation under continuous lightning strike

1) 由于连续雷击过程持续时间极短, 首次与后续回击的时间间隔为  $0 \sim 1$  s, 相邻回击之间的时间间隔为  $0 \sim 500$  ms, 而完成回击的过程时间仅为  $50 \sim 100 \mu s$ , 因此不考虑连续雷击过程中热能的逸散;

2) 在雷电流流经导电混凝土基础时, 会有部分电流经由击穿土壤而形成散流通道向外逸散, 由于这部分电流远小于流经导电混凝土基础的电流, 且散流通道的形成具有很大的随机性, 因此, 只考虑雷电流流经导电混凝土基础产生的热量对整体接地装置温升的影响;

3) 随着放电过程的发展, 土壤结构和成分都会发生变化, 如水分、盐碱度等, 对土壤的电阻率作固化处理。

## 2 连续雷电冲击下导电混凝土基础的冲击散流特性

### 2.1 雷击杆塔后入地电流

常见输电线路雷击类型分为直击与感应雷过电压<sup>[10-11]</sup>, 根据雷击点位置的不同, 直击雷可分为雷击杆塔顶端、雷击避雷线档距中央和雷击导线 3 种形式,

其中,雷击杆塔顶端对电力系统危害最大。因此,选取4号杆塔塔顶作为雷击点,以10 kV线路为例。

考虑建立雷电通道的过程十分复杂,雷电通道受温度、湿度等因素的影响,产生的分支和方向都难以预测,复杂的电磁变化出于实际工程需要,对雷电通道进行简化<sup>[12]</sup>,忽略分支和方向,将通道看作垂直于大地的圆柱体,通道外的电荷密度为零,采用R-C电路等效雷电通道,如图4所示。以10 kV线路为例,选取4号杆塔塔顶作为雷击点,在ATP-EMTP仿真软件中搭建仿真模型<sup>[13-14]</sup>,得到入地电流波形,如图5所示。

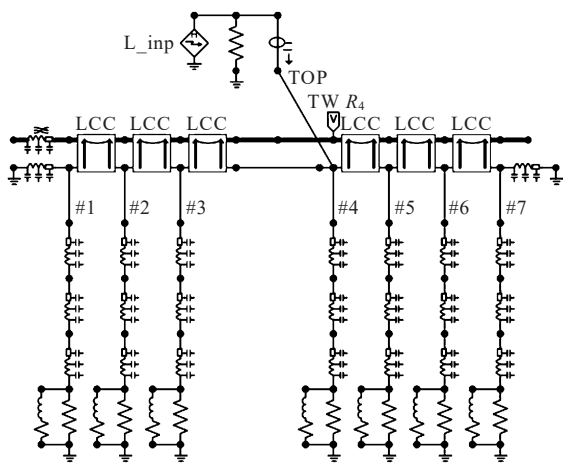


图4 雷击杆塔模型

Figure 4 Lightning striking tower model

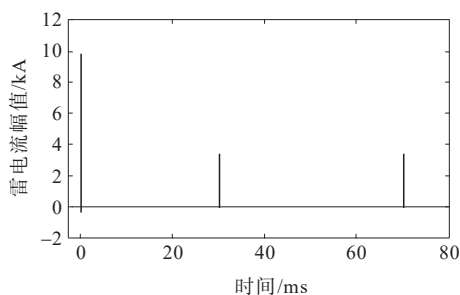


图5 入地电流波形

Figure 5 Ground current waveform

选取4号杆塔塔顶作为雷击点,得到首次与后续雷击入地电流峰值分别为9.876、3.383、3.383 kA。在雷电流流入大地的过程中,能量绝大多数以热能的形式向周围环境散发,工程上规定接地体内、外温差不能超过300℃,而导电混凝土基础的温差一般上升到350~400℃就会破坏导电混凝土的内部结构。

## 2.2 连续雷电冲击对杆塔的冲击接地电阻的影响

取后续雷击次数 $m=1$ ,调整2次雷击事件间隔,进行重复仿真试验,得到连续雷电冲击下的冲击接地电阻,如图6所示。

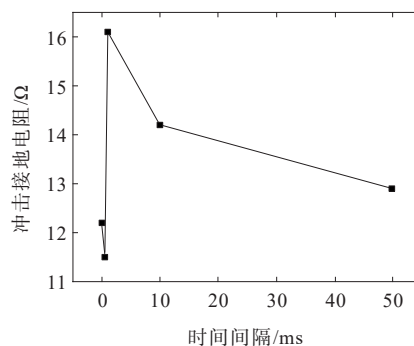


图6 连续雷击下不同时间间隔导电混凝土基础冲击接地电阻

Figure 6 Impulse grounding resistance of conductive concrete foundation at different time intervals under continuous lightning strike

从图6中可以看出,当时间间隔为0.5 ms时,前次雷击使得土壤被击穿,增强了土壤的散流能力。土壤还未完全恢复到初始状态,后续雷击到来,此时的钢管桩冲击接地电阻低于在单脉冲下的钢管桩冲击接地电阻。在时间间隔为1 ms时,前次与后续雷击一同作用在钢管桩上,但此时土壤已经恢复到初始状态,且在放电过程中土壤水分降低,土壤电阻率上升,钢管桩冲击接地电阻达到峰值。时间间隔为10 ms时土壤电阻率增大,但前次雷击的能量减小,钢管桩冲击接地电阻降低。50 ms时前次雷击完全结束,土壤电阻率上升,此时的钢管桩冲击接地电阻达到低点,但高于单脉冲下的钢管桩冲击接地电阻。

## 3 连续雷电冲击下导电混凝土基础的热效应分析

### 3.1 首次雷电冲击下导电混凝土基础的热效应

建立导电混凝土ATP仿真模型,初始条件为导电混凝土长度 $l=30$  m,接地体半径 $r=0.55$  m,土壤电阻率 $\rho=1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ ,埋深 $h=0.5$  m,雷电流幅值 $I_m=40$  kA。首先,在不考虑火花效应的情况下计算导电混凝土基础散流,再考虑火花效应;然后,由土壤临界击穿场强及导电混凝土基础散流计算其等效接地半径,重新确定导电混凝土基础各项参数,测得导电混凝土基础冲击电流波形,如图7所示,可知单次雷击下导电混凝土基础冲击电流波形并不是一个规则的波形。这是因为土壤导电性能较差,且导电混凝土基础的对地电容参与了雷电流的扩散,在电容效应的影响下,导致雷电流波形的抖动。由于计算热量需要电流的函数式,考虑到计算的复杂程度,对波形选点,然后对点进行拟合,得到拟合函数:

$$y = \frac{A - D}{1 + (x/C)B} + D \quad (9)$$

其中,  $A=10\ 100.5$ ,  $B=0.721\ 483\ 375\ 861\ 521$ ,  $C=4.777\ 593\ 701\ 408\ 7 \times 10^{-6}$ ,  $D=29.760\ 000\ 000\ 007\ 6$ 。拟合函数波形如图 8 所示。

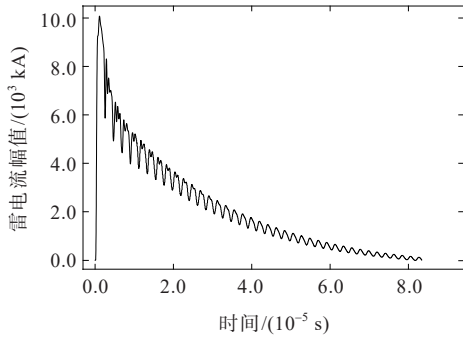


图 7 单次雷击下导电混凝土基础冲击电流波形

Figure 7 Impulse current waveform of conductive concrete foundation under a single lightning strike

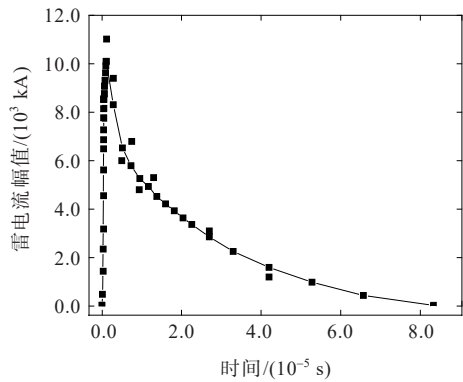


图 8 拟合函数波形

Figure 8 Fitting function waveform

钢筋电阻率  $\rho=6.58 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ , 单位长度的钢筋电阻  $R_1=\rho \cdot l/S=8.38 \times 10^{-3} \Omega$ ; 钢筋的比热容  $\gamma$  取  $4.6 \times 10^2 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 计算出导电混凝土基础在冲击电流 0.11 ms 时间内温升  $\Delta t_1=Q/cm=267.36 < 300^\circ\text{C}$ , 因此, 首次雷电冲击下导电混凝土基础是安全稳定的。

### 3.2 连续雷电冲击下导电混凝土基础的热效应

计算后续雷击产生的温升, 取后续雷击次数  $m=2$ , 后续雷击之间的时间间隔  $\Delta T=30 \text{ ms}$ , 而导电混凝土产生的热量在短时间内很难排出去, 因此, 不考虑在先、后雷击之间的热量逸散, 导电混凝土的温升特性<sup>[15-17]</sup>如图 9 所示。计算方法同首次雷击, 计算可得后续雷击在导电混凝土基础上产生的温升  $\Delta t_2=Q/cm=19.7^\circ\text{C}$ 。后续雷击导电混凝土基础冲击电流波形如图 10 所示。

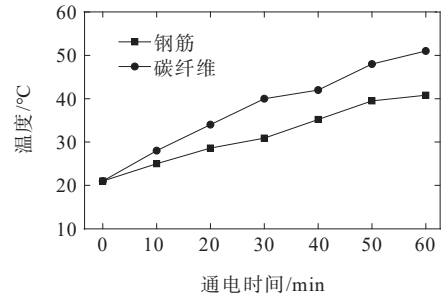


图 9 导电混凝土温升特性

Figure 9 Temperature rise characteristics of conductive concrete

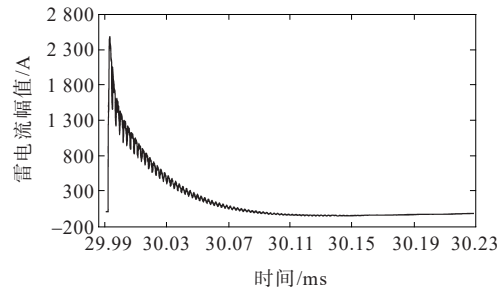


图 10 后续雷击导电混凝土基础冲击电流波形

Figure 10 Impulse current waveform of subsequent lightning strikes on conductive concrete foundation

忽略热量损失, 前、后 2 次雷击在导电混凝土基础上产生的温升  $\Delta t=\Delta t_1+\Delta t_2=287.06 < 300^\circ\text{C}$ , 且由于忽略了热量损失, 实际温升会小于理论温升。因此, 当连续雷击次数  $n \leq 2$  时, 导电混凝土基础是安全稳定的; 当  $n \geq 3$  时, 导电混凝土基础的温升  $\Delta t > 300^\circ\text{C}$ , 有可能会破坏导电混凝土基础的内部结构, 提高了电力系统稳定运行的安全风险。

## 4 结语

1) 在连续雷击过程中, 导电混凝土基础的冲击接地电阻在 0.5 ms 内下降了 9.9%, 随着雷击过程的结束, 接地电阻先上升后下降为  $13.0 \Omega$ , 相较于初始的接地电阻提高了 6.56%, 这是因为导电混凝土基础的热效应改变了周围土壤的盐碱度和含水量。因此, 在工程实际中应当注意导电混凝土基础对周围土壤电阻率的影响。

2) 在连续雷击下, 当连续雷击包含的雷击数  $n \leq 2$  时, 杆塔导电混凝土基础是安全稳定的; 当  $n \geq 3$ , 导电混凝土基础的温升  $\Delta t > 300^\circ\text{C}$ , 导电混凝土基础的结构存在被破坏的可能, 会给电力系统稳定运行带来安全风险。针对雷电多发地区, 应当尽可能减小导电混凝土基础周围土壤的电阻率, 增强其散流散热能力, 如添加降阻剂、加装水平接地体等。

## 参考文献:

- [1] 杨柳林,李宇.基于改进的两支路ResNet的配电网接地故障辨识和选线[J].电测与仪表,2022,59(10):100-107.  
YANG Liulin, LI Yu. Grounding fault identification and line selection of distribution network based on improved two-branch ResNet[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10): 100-107.
- [2] 陈池瑶,苗世洪,殷浩然,等.基于注意力机制一卷积神经网络的配电网单相接地故障选线方法[J].电力建设,2023,44(4):82-93.  
CHEN Chiyao, MIAO Shihong, YIN Haoran, et al. Single-phase grounding-fault line selection method based on attention mechanism-convolution neural network for distribution network[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 82-93.
- [3] 唐祖全,钱觉时,杨再富.导电混凝土研究进展[J].重庆建筑大学学报,2006,28(6):135-139.  
TANG Zuquan, QIAN Jueshi, YANG Zaifu. Research progress of electrically conductive concrete[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(6): 135-139.
- [4] 孙旭.导电混凝土在变电站接地网中的应用[J].高压技术,2001,27(S1):66-67.  
SUN Xu. Application of conductive concrete in grounding grid in substation[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(S1): 66-67.
- [5] 蔡力,田洸鑫,魏俊涛,等.连续冲击电流脉冲下避雷器阀片电气性能研究[J].电工技术学报,2023,38(S1):168-176.  
CAI Li, TIAN Ruixin, WEI Juntao, et al. Research on the electrical performance of ZnO varistors under multiple impulse current pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(S1): 168-176.
- [6] 彭程,阳晋,邹军.共享杆塔时域仿真模型及线缆雷电流分布[J].高压电器,2022,58(4):40-46.  
PENG Cheng, YANG Jin, ZOU Jun. Time domain simulation model of shared tower and lightning current distribution of cable[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 40-46.
- [7] DL/T 620—1997.交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].  
DL/T 620—1997. Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S].
- [8] 李臻奇,蔡翔,易浩,等.考虑接地电阻特性影响的差异性杆塔接地设计[J].电力科学与技术学报,2016,31(4):168-174.  
LI Zhenqi, CAI Xiang, YI Hao, et al. Study on difference tower grounding considering the characteristics of the grounding resistance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 168-174.
- [9] 李云阁.ATP-EMTP及其在电力系统中的应用[M].北京:中国电力出版社,2016:55-56.  
LI Yunge. ATP-EMTP and its application in power system[M]. Beijing: China Power Publishing House, 2016: 55-56.
- [10] 龚泽.基于OPGW的输电线路雷击定位方法研究[D].武汉:华中科技大学,2016.  
GONG Ze. Research of Lightning Striking location on transmission line based on OPGW[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [11] 任华,李健,弥潇,等.±110 kV吉泉线雷击致灾因子权重分析及高风险杆塔筛选[J].中国电力,2022,55(2):115-124.  
REN Hua, LI Jian, MI Xiao, et al. Weight analysis of lightning disaster factors and high risk tower identification for ±110 kV Jiquan line[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 115-124.
- [12] 张静.闪电通道辐射特性及耦合效应的研究[D].南京:南京信息工程大学,2018.  
ZHANG Jing. Analyses on radiation and coupling characteristics of lightning channel[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2018.
- [13] 王宇鹏,蒋哲,武诚,等.基于直流短路比的交直流系统送端暂态过电压评估指标研究[J].智慧电力,2023,51(12):8-14+22.  
WANG Yupeng, JIANG Zhe, WU Cheng, et al. Evaluation index of transient overvoltage in AC/DC sending-end system based on DC short-circuit ratio[J]. Smart Power, 2023, 51(12): 8-14+22.
- [14] 黄亮亮,陈建坤,温彦军,等.基于5G通信的配电网架空线路差动保护应用技术[J].供用电,2022,39(9):5-10.  
HUANG Liangliang, CHEN Jiankun, WEN Yanjun, et al. Differential protection application technology of distribution network overhead line based on 5G communication[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 5-10.
- [15] 吴献,崔玉茜,回国臣,等.炭黑导电混凝土和碳纤维炭黑导电混凝土电热试验[J].沈阳建筑工程学院学报(自然科学版),2015,31(3):449-457.  
WU Xian, CUI Yuqian, HUI Guocheng, et al. Experimental study on the electro-thermal behavior of conductive concretes with carbon black and carbon fiber-carbon black[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2015, 31(3): 449-457.
- [16] 匡福志,李霞,钟湘平,等.山区配电线路塔位地形雷击风险分类[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):66-72.  
KUANG Fuzhi, LI Xia, ZHONG Xiangping, et al. Classification of lightning strike risk for distribution line tower terrain in mountainous area[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 66-72.
- [17] 黄宇辰,杨真.雷击输电线路时全波电磁暂态特性研究[J].电网与清洁能源,2022,38(9):10-16.  
HUANG Yuchen, YANG Zhen. A study on full-wave electromagnetic transient characteristics when lightning strikes a transmission line[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 10-16.