

基于变电站雷电安全运行年的避雷线塔 空气击距简化计算方法

邢毅, 骆玲, 丁晓飞, 李良霄, 唐紫嫣

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要:针对规范中对避雷线塔与保护设备间的空气击距取值要求不明确,在实际变电工程中存在裕度过大的问题,提出了一种空气击距简化计算方法。首先,在分析避雷线塔的冲击接地电阻影响因素和避雷线的雷电分流效应的基础上,采用基于变电站雷电安全运行年数的概率法,根据变电站的具体布置尺寸,对比变电站实际每年遭受雷击的概率,确定避雷线塔空气击距的临界雷击的概率;然后,通过雷电流的概率分布,求得对应临界雷电流的幅值,并根据雷击避雷塔暂态电位简化模型和雷电冲击穿场强,获得避雷线塔与被保护设备间空气击距的简化计算方法;最后,结合实际变电站案例,进行了基于变电站雷电安全运行年数的避雷线塔空气击距计算,类比规范计算方法提出相应的简化计算公式,并分析了空气净距取值对变电站电气布置的影响。

关键词:避雷线塔;雷电安全运行年;暂态电位升;临界雷电流幅值;空气击距;简化计算方法

中图分类号:TM 862 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2025)02-0092-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250214

Simplified Calculation Method for Air Striking Distance of Lightning Protection Towers Based on Lightning Safe Operation Years in Substation

XING Yi, LUO Ling, DING Xiaofei, LI Liangxiao, TANG Zhiqiang

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering
Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Due to the unclear value requirements for air striking distance between lightning protection towers and protected equipment in the regulations, there is often excessive margin in the actual power transformation projects. Firstly, based on the analysis of the factors affecting impulse grounding resistance and the lightning diversion effect of lightning protection lines, the probability method based on lightning safe operation years in substation is adopted, and according to the layout of substations, the actual annual lightning stroke probability is compared to determine the critical lightning stroke probability of air striking distance of lightning protection towers. Secondly, the amplitude of the corresponding critical lightning current is obtained through the probability distribution, and based on the simplified transient potential model of lightning protection towers and breakdown field, a simplified calculation method for determining the air striking distance between lightning protection towers and protected equipment is obtained. Finally, based on actual substation cases, the calculation is carried out, the corresponding simplified calculation formula is proposed and the influence of air clearance on the electrical layout of substations is analyzed.

Key words: lightning protection tower; lightning safe operation year; transient potential rise; critical lightning current amplitude; air striking distance; simplified calculation method

0 引言

变电站和换流站采用的直击雷保护装置有避雷

针和避雷线两种。当采用避雷线防护方式时,在站内须设置若干独立或者构架的避雷线塔,在避雷线塔间架设避雷线对电气设备进行防雷保护。相比于避雷针保护,避雷线在遭受雷击时存在分流作用,流

经单个避雷线塔的雷电流较小^[1-2]。相比于多榀构架避雷线塔,独立避雷线塔无架构间的雷电分流作用,遭受雷击时引起的暂态电位升较高,塔身对设备最近位置为易发生雷电反击的关键位置。独立避雷针和避雷线与被保护设备的空气击距在GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》^[3]中有规定,但对避雷线塔的空气击距未做明确规定。在实际工程中,避雷线塔的空气击距多按该规范建议值5 m选取,以较大的裕度涵盖变电站内各影响因素,或参照独立避雷针的击距公式进行校核。该规范中空气击距校验公式基于150 kA雷电流幅值,而实际变电站的雷电安全运行年数、校验雷电流幅值、避雷线塔间雷电分流、变电站布置尺寸、被保护设备运行电压等因素,均对避雷线塔与被保护设备的空气击距有影响。根据这些因素确定避雷线塔与被保护设备的空气击距的差异化取值,可在保证雷电安全运行的前提下,对变电站电气平面布置做合理优化。

为准确确定雷击避雷线塔暂态电位分布,可采用基于电磁场的数值计算法^[4],但工程应用该方法步骤繁琐。下面基于变电站雷电安全运行年数,采用简化的杆塔计算模型,提出了适用于工程应用的独立避雷线塔空气击距简化计算方法,为避雷线塔布置优化提供了依据。

1 雷击暂态电位升基本原理

由于杆塔电感和接地电阻的存在,雷击避雷线时,避雷线塔的暂态电位显著升高。为正确计算雷击时避雷线塔上的电位升,需要合理地建立避雷线塔暂态模型,根据空气雷电击穿场强,获得避雷线塔对应校验位置的空气击距。

1.1 杆塔计算模型

参考目前国内外输电线路杆塔防雷计算模型,通常采用集中电感、单波阻抗、多波阻抗3种模型^[5]。集中电感模型忽略杆塔上的波过程,杆塔采用等值电感值模拟;单波阻抗模型考虑了雷电波从塔顶传导到地面需要的时间,采用单一波阻抗模拟;多波阻抗模型还考虑了杆塔不同位置的雷电响应差异,采用不同波阻抗模拟。中国现行防雷规范均采用集中电感模型,这里对避雷线塔亦采用此模型。

避雷线塔校验高度 $h_x(x=1,2,3,\dots)$ 处的暂态

电位升按式(1)计算。

$$U = iR_i + L_0 h_x di/dt \quad (1)$$

式中: U 为避雷线塔校验高度的暂态电位升,kV; i 为流经避雷线塔的雷电流幅值,kA; R_i 为避雷线塔接地装置的冲击接地电阻, Ω ; L_0 为避雷线塔单位长度的等值电感, $\mu\text{H}/\text{m}$; t 为雷电流持续时间, μs 。

1.2 避雷线分流系数选取

雷击变电站内避雷线防雷系统见图1,假设为4根避雷线塔防护系统。

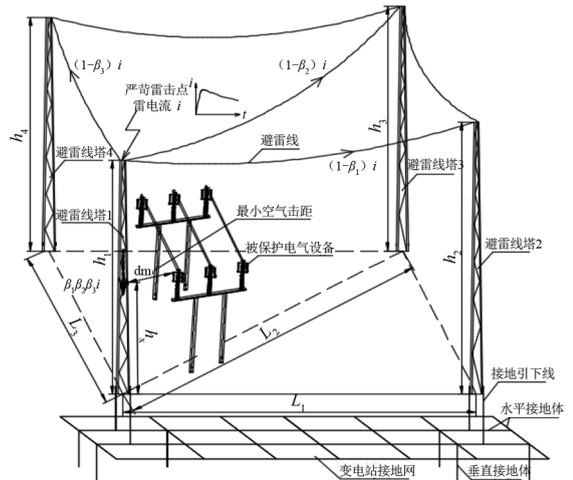


图1 雷击变电站内避雷线防雷系统

避雷线塔1、塔2的高度分别为 h_1 、 h_2 ,避雷线塔1与塔2的距离为 L_1 。实际避雷线塔的接地装置型式相同且与主地网连接冲击电阻较小,对雷电流分流的影响远不及雷电流流经避雷线和杆塔的电感。工程计算近似认为避雷线塔的分流系数主要与雷电流的路径有关,与GB/T 50064—2014中的空气击距校验点在避雷线跨中的分流系数计算原理相同。偏严苛考虑,选取雷击点位于需校验的避雷线塔顶部,其余避雷线分流作用最小。避雷线塔2对于避雷线塔1的分流系数 β_1 选取为

$$\beta_1 = \frac{L_1 + h_2 + R_i \tau_i / 2L_0}{L_1 + h_2 + h_1 + R_i \tau_i / L_0} \approx \frac{L_1 + h_2}{L_1 + h_1 + h_2} \quad (2)$$

式中, τ_i 为雷电流波头时间, μs 。

同理,可求得避雷线塔3、塔4对避雷线塔1的分流系数 β_2 、 β_3 ,实际流过避雷线塔1的雷电流为 $\beta_1 \beta_2 \beta_3 i$,分流系数取值可在该计算值基础上考虑适当的安全系数。

1.3 避雷线塔冲击接地电阻选取

避雷线塔一般采用接地引下线与主接地网相连,并在连接处设置垂直接地体,以便雷电流散流。

变电站内主接地网为网格状布置,以水平接地体连接垂直接地体,避雷线塔的工频接地电阻 R_g 按照 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》^[6] 确定,杆塔接地系统的冲击系数 α 选取^[7] 为

$$\alpha = \alpha_i R_g / \eta_i \quad (3)$$

式中: α_i 为接地导体的冲击接地系数,偏保守可取 1; η_i 为计及接地体相互影响的冲击利用系数,可取 0.65。

根据雷击杆塔散流特性和大型接地网的雷电冲击暂态特性^[8-9],避雷线塔有效散流区域集中在避雷线塔附近的局部地网区域,可按照周边 15 m 范围内接地体布置确定的冲击接地电阻。

2 基于安全运行年数求取雷电击距

2.1 安全运行年数雷击概率

雷击实际是概率事件,按照目前变电站的避雷针和避雷线的防雷保护范围计算方法,变电站在安全运行年数内是安全。按照 GB/T 50064—2014 的规定,330 kV 和 500 kV 变电站的雷电安全运行年数分别不小于 600 年和 800 年,实际设计可取 1.2 安全系数。

在标准雷电波形和给定的避雷线防雷系统下,决定避雷线塔和被保护设备空气击距大小的因素为雷电流的幅值。出现足够大电流雷击将导致避雷线塔与保护设备间的空气间隙击穿,将该雷击电流称为临界雷电流。临界雷电流出现的平均间隔年限,须大于变电站设计雷电安全运行年数。

假设变电站设计雷电安全运行年数为 N , 平均每年遭受该大电流雷击的次数为 $1/N$ 。对应出现临界雷电流的地闪密度为

$$e_m = \frac{10^6}{0.015k(a + 10h)(b + 10h)N} \quad (4)$$

式中: e_m 为临界雷电流地闪密度,次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$); a 、 b 、 h 分别为变电站的长度、宽度、高度, m; k 为选择性雷击系数,一般地区取 1,对有水的山谷、土壤电阻率突变的区域,可适当增大。

2.2 临界雷电流幅值

通过站址范围内所有雷击的地闪密度和临界雷电流的地闪密度之比,可得临界雷电流出现的概率 P_m 为

$$P_m = e_m / e_a \quad (5)$$

式中, e_a 为站址所有雷击地闪密度,次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。参考 GB/T 50064—2014 中雷击杆塔的电流幅值概率公式,可推得临界雷电流幅值。一般地区,临界雷电流的幅值 i_m 为

$$i_m = -88 \lg P_m \quad (6)$$

2.3 避雷线塔空气击距

电气设备运行电压为工频 50 Hz 时,工作电压变化远慢于雷击避雷线塔暂态电位升。在雷击避雷线塔引起暂态电位升的时刻,可认为电气设备的工作电压是保持不变的,须考虑避雷线塔暂态电位升与工作电压反向的严苛工况。

将临界雷电流幅值 i_m 代入式(1),考虑被保护电气设备工作电压和雷电冲击空气击穿场强,获得避雷线塔的空气击距 d_m 为

$$d_m = \frac{i_m R_i + L_0 h_x di_m / dt + \sqrt{2/3} U_{em}}{E_a} \quad (7)$$

式中: U_{em} 为被保护电气设备最高系统工作线电压, kV; E_a 为空气的雷电冲击击穿场强,近似取 750 kV/m。雷电波采用 2.6/50 μs 的标准双斜角波,波头对雷电冲击的暂态过程的影响比波尾更明显,工程可近似选取 di_m / dt 为雷电流波头的陡度。参照 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[10] 的规定,避雷线塔的等值电感 L_0 可取 0.5 $\mu\text{H}/\text{m}$ 。

按此方法计算避雷线塔的空气击距,充分考虑了变电站设计雷电安全运行年数和变电站的布置特点,适宜工程实际应用。

3 实际算例分析

3.1 变电站避雷线塔空气击距计算

某敞开式 500 kV 变电站,按照图 1 布置的 4 避雷线塔系统为例,计算 220 kV 和 500 kV 区域避雷线塔距离被保护设备的空气击距。

变电站的长度、宽度、高度(最高避雷线塔)分别为 380 m、240 m、50 m。避雷线塔的接地装置与主地网连接,主地网采用扁钢,埋深 0.8 m 网格 15 m \times 15 m 布置,水平接地体等效直径为 0.04 m,避雷线塔的集中垂直接地体采用 3 根长度 2.5 m、直径 20 mm 的钢棒,土壤电阻率为 800 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

变电站设计雷电安全运行年数为 960 年,站址位于一般地区,雷电地闪密度为 7.98 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。

避雷线塔1、塔2、塔3、塔4的高度分别为35 m、35 m、50 m、50 m;避雷线塔1距离避雷线塔2、塔3、塔4的距离分别为55 m、110 m、95 m;避雷线塔1、塔3(对应220 kV和500 kV区域)校验设备高度分别为8 m、10 m。

按照前述方法计算避雷线塔1、塔3的空气击距相关结果见表1所示。

表1 避雷线塔空气击距计算结果

项目	避雷线塔1	避雷线塔3
避雷线塔冲击接地电阻 R_i/Ω	14.56	14.56
被保护电气设备最高运行电压 U_{em}/kV	252	550
避雷线塔分流系数 β	0.733	0.547
临界雷击电流幅值 i_m/kA	164.9	164.9
接地电阻决定距离系数 (i_m/E_a)/($m \cdot \Omega^{-1}$)	0.22	0.22
杆塔电感决定距离系数 $\frac{L_0 di_m/dt}{E_a}$	0.042	0.042
避雷线塔校验高度 h_x/m	8	10
避雷线塔空气击距 d_m/m	2.82	2.54

3.2 击距计算结果分析

实际工程中若按照独立避雷针的空气击距公式计算,220 kV和500 kV避雷线塔对应高度的空气击距值分别为3.72 m和3.92 m,GB/T 50064—2014建议的5.00 m取值显然裕度较大。

根据上述算例分析,考虑变电站雷电安全运行年、避雷线塔间雷电流、电气设备运行电压、变电站布置尺寸等多重因素后,220 kV和500 kV侧避雷线塔距离被保护设备的空气击距要求为2.82 m和2.54 m。

所提计算方法的优化主要体现在以下3个方面:

1)雷电流取值。通过设计雷电安全运行年数和变电站布置尺寸,选取校验临界雷电流幅值为164.9 kA,大于规范中空气击距校验公式选取的150 kA固定雷电流幅值。

2)分流系数选取。考虑1.15安全系数,若只计算避雷线塔2对校验避雷线塔1的分流,其分流系数 $\beta_1=0.828$,计算避雷线塔2、塔3、塔4对校验避雷线塔1的总分流系数 $\beta_1\beta_2\beta_3=0.733$,可见多避雷线塔的分流效应叠加后,校验避雷线塔分流系数降低显著。

3)保护设备工作电压。雷击避雷线塔时刻,避雷线塔与电气设备间的空气间隙受杆塔暂态电位叠加设备工作电压的影响。按前述严苛工况,电气设备工作电压越高,对空气击距的影响越大。

为便于与规范对比,将该算例总结为基于雷电安全运行年数的避雷线塔空气击距 S_a ,其计算公式为

$$S_a = \beta(0.22R_i + 0.042h_x) + 1.09 \times 10^{-3}U_{em} \quad (8)$$

计算方法基于变电站雷电安全运行年,并考虑了多重影响因素,可对算例站内各位置避雷线塔的空气击距进行差异化计算,使避雷线塔空气击距校验计算更安全合理。

实际工程中避雷线塔与被保护设备的距离需要满足空气击距和带电距离的较大值。由上述算例分析可知,500 kV侧配电装置对避雷线塔的带电距离要求为3.8 m,避雷线塔对10 m高设备的空气击仅为2.54 m。而220 kV侧配电装置对避雷线塔的带电距离要求仅为1.8 m,避雷线塔对8 m高设备的空气击距达到2.82 m。避雷线塔的空气击距可决定220 kV及以下电气设备与避雷线塔间净距的取值,进而影响该配电装置的布置。

4 结 论

采用基于变电站雷电安全运行年数的概率法,对决定避雷线塔空气击距的临界雷电流进行求取,进而获得避雷线塔的空气击距简化计算方法,便于工程应用。主要结论如下:

1)避雷线塔与被保护物空气间隙雷电击穿概率按变电站设计雷电安全运行年数确定。基于变电站布置尺寸和站址地闪密度,求取临界雷击电流出现的概率和电流幅值,进而根据雷击避雷塔暂态电位简化模型和避雷线塔分流计算公式,获得避雷线塔空气击距的简化计算公式。

2)以某500 kV变电站为例,计算得到220 kV和500 kV区域避雷线塔空气击距的准确控制值和类比规范的避雷线塔空气击距计算公式;分析了所提方法的主要优化内容,避雷线塔间分流对空气击距计算影响显著。结合配电装置考虑,220 kV及以下配电装置区域避雷线塔的空气击距更影响电气设备布置。

参考文献

[1] 张纬钺,何金良,曾嵘.过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2000:126-129.

(下转第102页)

于传统滑模从反电势中提取位置和转速信息,改进滑模观测器利用转子磁链来提取相关信息,无需低通滤波和位置补偿,拓宽了传统滑模转速稳定运行区间,并采用加权函数切换方法将两种观测器平滑地从低速段过渡到高速段。由仿真结果可知,所设计的方法在带载启动、运行和带速重投时,能够在全速范围内准确获得转速和转子位置,做到精确控制,系统整体具有较高鲁棒性。

参考文献

- [1] 璩晶磊,李少波,陈金坤. 基于质量数据融合及规则挖掘的离散制造过程监控方法[J]. 计算机集成制造系, 2017,23(9):1962-1971.
- [2] LIU K B, HUANG S. Integration of Data Fusion Methodology and Degradation Modeling Process to Improve Prognostics[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(1):344-354.
- [3] GRASSO M, COLOSIMO B M, PACELLA M. Profile monitoring via sensor fusion: the use of PCA methods for multi-channel data [J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(20):6110-6135.
- [4] 刘建康,郝尚华,王树华,等. 数据驱动的数控加工生产线实时监控与优化控制技术框架[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(8):1875-1884.
- [5] LIU J M, ZHU Z Q. Rotor position estimation for dual-three-phase permanent magnet synchronous machine based on third harmonic back-EMF [C]//2015 IEEE Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), June 7-8, 2015, Sydney, Australia. IEEE, 2015:1-8.
- [6] 张洪师,王平,韩邦成. 基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报,2014,34(12):1889-1896.

- [7] HAMED H A, ELBARBARY Z M, MOURSIS M S, et al. A new δ -MRAS method for motor speed estimation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(3):1903-1906.
- [8] 杜思宸,全力,朱孝勇,等. 基于高频注入的永磁同步电机零低速下位置传感器失效故障容错控制[J]. 中国电机工程学报,2019,39(10):3038-3047.
- [9] LIU J M, ZHU Z Q. Novel sensorless control strategy with injection of high-frequency pulsating carrier signal into stationary reference frame [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4):2574-2583.
- [10] 张国强,王高林,徐殿国. 基于无滤波器方波信号注入的永磁同步电机初始位置检测方法[J]. 电工技术学报,2017,32(13):162-168.
- [11] 毕峰,贾晓芬. 基于 EKF 的 PMSM 无传感器控制仿真分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2021,39(1):64-68.
- [12] TERMIZI M S, LAZI J M, IBRAHIM Z, et al. Sensorless PMSM drives using Extended Kalman Filter (EKF) [C]//2017 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), October 30-31, 2017, Kuala Lumpur, Malaysia. IEEE, 2017.
- [13] 程亚楠,刁俊,苏子华,等. 基于新型滑模观测器的 PMSM 无传感器控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022,(12):89-93.

作者简介:

廖宗毅(1996),男,硕士,工程师,从事电力营销、新能源规划与优化运行工作;

孙睿哲(1997),男,硕士,工程师,从事电气设备检修与新能源并网控制工作;

冉韵早(1998),女,硕士,工程师,从事电力营销与综合能源规划调度工作;

刘鑫东(1995),男,硕士,研究方向为电机驱动控制。

(收稿日期:2024-05-11)

(上接第 95 页)

- [2] 中国机械工业联合会. 建筑物防雷设计规范: GB 50057—2010[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
- [3] 中国电力企业联合会. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
- [4] 张波,薛惠中,金祖山,等. 遭受雷击时输电杆塔及其接地装置的暂态电位分布[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):393-398.
- [5] 张永记,司马文霞,张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术, 2006,32(7):93-97.
- [6] 中国电力企业联合会标准化管理中心. 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012.

[7] 中国电力工程顾问集团有限公司. 电气工程设计手册 变电站设计[M]. 北京:中国电力出版社,2018.

[8] 李冠华,金鑫,赵义松. 大型变电站接地网雷电冲击暂态特性的仿真[J]. 电瓷避雷器, 2019,6(3):92-97.

[9] 曹晓斌,高竹青,马御棠,等. 雷击下 500 kV 杆塔接地装置的散流有效性[J]. 高电压技术, 2017,43(5):1596-1601.

[10] 电力工业部绝缘配合标准化技术委员会. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—1997[S]. 北京:中国电力出版社,1997.

作者简介:

邢毅(1983),男,硕士研究生,高级工程师,从事变电站、换流站设计及技术管理工作。

(收稿日期:2024-04-19)