

35 kV 架空线路中并联间隙的单相同线安装方式

姚 铮¹, 杨 鑫¹, 蒋凌峰¹, 吴文峰¹, 王延夫¹, 汤 昕²

(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,湖南长沙 410131)

摘 要: 35 kV 线路杆塔高度远高于 10 kV 线路,其防雷配置偏少,雷击跳闸率偏高。本文提出采用单相同线安装并联间隙的方法来提高线路耐雷水平,即在同一回路的固定单相安装并联间隙。35 kV 架空线路的跳闸机制为相间短路故障,并联间隙在单相安装方式下,可由放电相导线对其他导线的耦合作用降低其余两相导线的过电压,从而降低线路发生相间短路的几率,提升线路的耐雷水平。通过建立 35 kV 架空线路过电压计算仿真模型,考虑避雷线和接地电阻的影响,计算了并联间隙在单相同线安装方式下对线路耐雷水平的影响。单相同线安装并联间隙,在线路无、单和双避雷线时,反击耐雷水平分别最大提升 81.9%、21.2%、11.1%;感应雷耐雷水平分别最大提升 68.2%、50.2%、38.4%。通过实验和计算,针对雷击形式的不同概率,给出了并联间隙采取单相同线安装方式后的放电距离确定原则。单相同线安装并联间隙的方法具有成本低、免维护的特点,可以作为 35 kV 架空线路的重要防雷手段。

关 键 词: 35 kV 架空线路;耐雷水平;并联间隙;单相同线安装方式;防雷

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.027 中图分类号: TM862 文章编号: 1673-9140(2023)03-0241-11

The single-phase installation mode of parallel gaps in 35 kV overhead lines

YAO Zheng¹, YANG Xin¹, JIANG Lingfeng¹, WU Wenfeng¹, WANG Yanfu¹, TANG Xin²

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

2.Changsha Electric Power Technical College, Changsha 410131, China)

Abstract: The 35 kV overhead lines have significantly taller towers compared to the 10 kV lines. However, the lightning protection configuration of the 35 kV lines is relatively insufficient, leading to a higher rate of lightning-induced trip outs. This paper proposes the installation of parallel gaps on a single phase as a means to enhance the lightning withstand level of the lines. Specifically, the parallel gaps are installed on the fixed single phase of the same circuits. The tripping mechanism for the 35 kV overhead lines is inter-phase short-circuit faults. The parallel gaps, when installed on a single phase, utilize the coupling effects to reduce the overvoltages of the other two phases, thereby reducing the rate of inter-phase short-circuit faults and improving the lightning withstand level of the 35 kV overhead lines. By establishing an overvoltage simulation model of 35 kV overhead lines, considering the effects of overhead ground wires and grounding resistance, the impact of parallel gaps on the lightning withstand level of the lines under the single-phase installation mode is calculated. When a single phase is equipped with parallel gaps, the maximum increments in lightning withstand levels

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52177015); 湖南省教育厅科学研究项目(ZJGB2016282)

通信作者: 杨 鑫(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统过电压及其防护和低温高压绝缘技术方面的研究; E-mail: yan_19830713@163.com

under counterattack are 81.9%, 21.2%, and 11.1% respectively, for scenarios with no overhead ground wire, a single overhead ground wire, and double overhead ground wires. Similarly, the maximum increments in lightning withstand levels under induction lightning are 68.2%, 50.2% and 38.4% respectively. Through experiments and calculations, the method to determine the discharge distance of the single-phase installed parallel gaps is proposed according to the probabilities of lightning strikes with different types. Single-phase parallel gaps, characterized by low cost and maintenance-free operation, can serve as important lightning protection measures for 35 kV overhead lines.

Key words: 35 kV overhead lines; lightning withstand level; parallel gaps; single-phase same line installation mode; lightning protection

35 kV 架空线路架设高度远高于 10 kV 架空线路,雷击概率高,防雷措施偏少,是电力系统的“雷害重灾区”^[1-3]。目前,中国 35 kV 架空配电线路雷电防护的主要措施有架设避雷线,加装线路避雷器、并联间隙,降低杆塔接地电阻等^[4-6]。

35 kV 架空线路加装避雷器,工程造价费用较高,缺乏经济性;线路氧化锌避雷器的雷击损坏率较高,后期运维工作量大,难以在线路杆塔上大范围加装。降低杆塔接地电阻和全线架设避雷线同样存在经济性问题,且对于高土壤电阻率地区,降低杆塔接地电阻较为困难,降阻效果不明显^[7-8]。

并联间隙可以提供雷电流的疏散通道,保护线路绝缘子,提高重合闸的重合成功率。文献[9]提出了数种并联间隙的设计方法,可以有效地提高并联间隙的可靠性。文献[10]提供了并联间隙的间隙距离确定方法。确定间隙的距离,使间隙在不误动的前提下,保护绝缘子免于击穿。然而,在安装方式上,并联间隙大都是在三相线路上同时安装。为了准确定位雷电流从而并联间隙放电电压水平应低于绝缘子的闪络电压,会导致线路的耐雷水平降低^[11-14]。

架空配电线路在发生相间短路时,继电保护装置才会立即动作,一般允许单相接地运行 1~2 h 时。这种跳闸机制与并联间隙的单相安装方式配合,会使得加装并联间隙后,线路耐雷水平得到提高。文献[13,15]提出通过在 10 kV 架空线路中采用并联间隙的单相安装方式,利用线路相间耦合的原理,使得线路耐雷水平得以显著提升。

35 kV 架空线路的跳闸机制与 10 kV 架空线路相似,即相间短路才会发生跳闸,因而,并联间隙的单相安装方式在 35 kV 电压等级同样适用。35 kV 与 10 kV 架空线路结构特点仍有较大区别,因此,单

相并联间隙的安装方式及其对线路耐雷水平的影响是不同的。

目前,并联间隙在配电网中的应用已有较多研究,如基于电弧运动特性和表面场强来分析新型并联间隙设计;设计并联间隙的结构来有效、可靠地降低间隙发生误动或拒动的可能性;针对杆塔在不同的地区合理确定并联间隙的间隙距离;研究在感应雷过电压下间隙安装位置或安装密度不同对配电线路耐雷水平的影响等。但是,目前并联间隙的核心问题依然存在,并联间隙有着较大的短接距离,会导致雷击跳闸率升高,电弧发展的路径不确定等。

本文提出在 35 kV 架空线路中单相同线安装并联间隙。建立 35 kV 架空线路雷电过电压计算的架空线路模型,分别在直击雷和感应雷 2 种情况下,单相同线安装的并联间隙在无/单根和双根避雷线 3 种情况下的反击耐雷水平和感应雷耐雷水平;从而得到 35 kV 架空线路中,并联间隙的单相同线安装方式下对耐雷水平的提升效果和最佳匹配间隙距离。为提升 35 kV 架空线路耐雷水平提供新的方法。

1 并联间隙的单相同线安装方式在 35 kV 架空线路上的应用

1.1 35 kV 架空线路的并联间隙单相同线安装方式

35 kV 线路与 10 kV 线路同属配电电压等级,断路器的跳闸机制同样为相间短路时跳闸,允许单相接地带电运行 1~2 h。35 kV 架空线路的耐雷水平同样可以定义为不使线路发生相间短路时雷电通道内雷电流幅值的最大值。

10 kV 架空线路中并联间隙的单相安装方式前期已有研究^[13]。然而,35 kV 线路相对于 10 kV 线路具有自身的特点:①35 kV 线路杆塔更高,杆塔模

型宜使用多波阻抗模型;②35 kV 线路存在无避雷线、单避雷线、双避雷线等不同设置,对并联间隙的防雷效果会产生不同的影响;③35 kV 线路杆塔部分采取了降阻措施,应考虑杆塔接地电阻的影响;④雷电过电压的主要形式有直击杆塔、绕击线路和感应雷过电压 3 种形式。因而,根据 35 kV 架空线路的特点,应研究安装并联间隙的单相同线安装方式的应用方法及其对 35 kV 线路耐雷水平的作用。

在 35 kV 线路上的并联间隙单相同线安装方式,采用每基杆塔上仅一相线路上安装并联间隙,且相邻杆塔也在相同相安装(以单回线路为例)。

10 kV 架空线路没有避雷线,横担距离也较短,单相并联间隙一般安装于最高相;对 35 kV 线路来说,大多已有避雷线保护,单相并联间隙一般安装在易遭绕击的边相一侧。并联间隙单相同线安装方式的结构如图 1 所示。

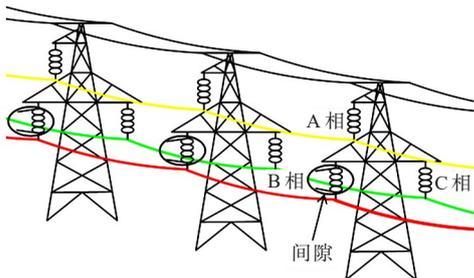


图 1 35 kV 单相同线安装的并联间隙
Figure 1 Single-phase installed parallel gaps in 35 kV overhead lines

1.2 并联间隙的单相同线安装方式提高 35 kV 线路耐雷水平的原理

并联间隙的单相同线安装方式下,并联间隙的放电优先级高于绝缘子,安装间隙的相电压下降,由导线间的耦合作用可以降低剩余两相导线的过电压,从而降低了 35 kV 架空线路发生相间短路的可能性。

1) 线路遭受感应雷时。

感应雷侵入线路时,三相线路均会产生大致相同的过电压。安装了单相并联间隙的相会率先放电,该相电压骤降,其他两相电压通过耦合作用也会降低,从而抑制其余两相的过电压,降低了相间短路的概率,提高了线路耐雷水平。

2) 直击杆塔。

由于 35 kV 线路架设避雷线。雷击塔顶时,雷电流将经杆塔及两侧避雷线入地,同时杆塔点位升高为 U_H ,如图 2 所示。当塔顶电位 U_H 达到并联间隙的放电电压时,此时该相线路(B相)并联间隙先放电,线路电压升高。同时,由于线路间的耦合作用,未安装并联间隙的线路(A、C相)电压也会升高,从而减少了 A、C 相与 B 相之间的电压差,降低了发生相间短路的概率,提高了线路的耐雷水平。

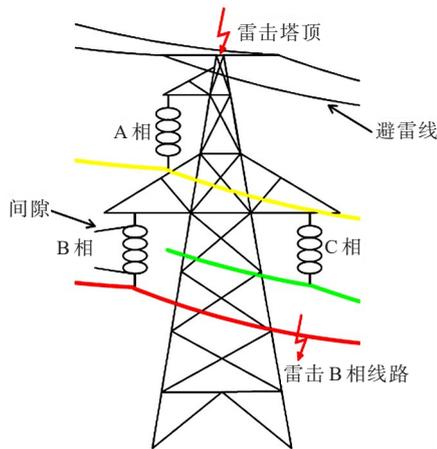


图 2 直击雷过电压防护机理分析
Figure 2 Overvoltage protection mechanism of direct lightning strikes

3) 绕击线路。

当线路安装了避雷线,则并联间隙的安装位置未边相。以 B 相遭受雷电绕击为例,并联间隙被击穿,使得杆塔的电位上升,继而对 A 相或 C 相绝缘子反击使其闪络,造成相间短路。因此,当线路发生绕击时,并联间隙的单相安装方式对线路耐雷水平提升效果不明显。

综上,从原理分析,35 kV 架空线路中,并联间隙的单相同线安装方式对提升感应雷过电压和直击塔顶 2 种情况下的耐雷水平具有显著作用。

1.3 35 kV 配电线路典型绝缘子串下并联间隙的间隙距离设置

35 kV 架空线路一般采用 3~5 片绝缘子串联结构,以典型的 U70BP/146-1 型绝缘子,4 片串联(如图 3 所示)为例,其绝缘子串的长度约为 584 mm。经测试,50% 雷电冲击闪络电压为 359.16 kV。

目前,并联间隙的结构可分为棒形、球形、羊角形、网球拍形等结构。本文间隙的结构形式采用 35 kV 线路典型使用的棒形间隙结构,如图 4 所示。



图3 35 kV U70BP/146-1 型绝缘子串

Figure 3 35 kV U70BP/146-1 insulator string

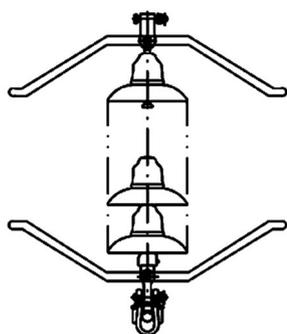


图4 棒形间隙

Figure 4 Bar gap

基于放电概率比较原则^[13],针对典型的4片串联的U70BP/146-1型绝缘子串,并联间隙的雷电冲击50%放电电压最高值应设为299.9 kV。

在35 kV电力系统中,内过电压应按4倍最高运行相电压考虑^[17]。并联间隙的50%雷电冲击放电电压应为系统内过电压的1.176倍^[20],因而,并联间隙50%雷电冲击放电电压的下限值应取155.6 kV。综上,针对典型的4片串联的U70BP/146-1型绝缘子串,并联间隙的50%雷电冲击放电电压范围取155.6~299.9 kV。

经试验,采用图3所示并联间隙,在50%雷电冲击放电电压范围取155.6~299.9 kV时,对应的间隙距离范围为408.8~554.8 mm。该放电距离可满足对雷电精准定位的同时也满足正常情况下不产生放电的要求。

表1 35 kV单回路杆塔的Hara多波阻抗型各部分的波阻抗

Table 1 The wave impedance of each part of the Hara multi-wave impedance type of 35 kV single-circuit tower

编号	H_k/m	r_{Tk}/m	R_{Tk}/m	R_{Ak}/m	R_B/m	R_b/m	Z_{Tk}/Ω	Z_{Lk}/Ω	Z_{Ak}/Ω
1	34.5	0.07	0.400	0.062 5	3.5	0.203	185.69	1971.21	420.40
2	32.5	0.07	0.528	0.334 0	3.5	0.203	180.72	1626.48	316.26
3	30.0	0.07	0.800	0.350 0	3.5	0.203	173.89	1565.01	308.65

2 35 kV 架空线路雷电过电压计算仿真模型

为了量化单相同线安装的并联间隙对35 kV架空线路耐雷水平的提升效果,本文建立了35 kV架空线路过电压计算的模型。

2.1 配线路及杆塔模型

雷电波频率高,陡度大,因此35 kV架空线路采用能反映频率特性的JMARTI模型;同时考虑到雷电波的传播作用,利用波阻抗模拟杆塔对雷电的阻塞作用。本文35 kV架空线路雷电压计算模型共9基杆塔,序号由电源侧至负荷侧从小到大排列(1~9)。档距为280 m,负荷采用感应负载来等效,如图5所示。

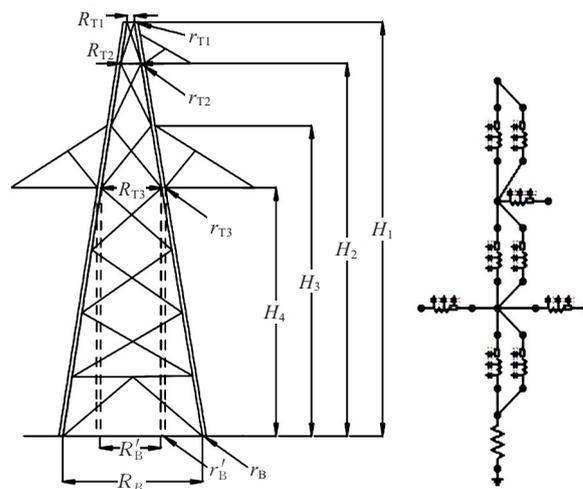


图5 杆塔结构图及波阻抗模型

Figure 5 Tower structure diagram and wave impedance model

经文献^[20]给出的多波阻抗模型参数计算方法可得,35 kV线路35B01-Z1型杆塔的多波阻抗参数如表1所示。

2.2 线路电源和绝缘子、并联间隙等效模型

线路中,电源采用幅值为 35 kV 的三相交流电源来模拟;绝缘子以及并联间隙由压控开关来模拟。根据文 2.3 节的计算和试验结果,绝缘子的放电电压设置为 359.16 kV。间隙的放电电压则在 155.6~299.9 kV 内变化。

2.3 雷电源模型

直击雷过电压模型采用 Heidler 冲击波电源模拟,波头波尾时间为 2.6/50 μs。

由于感应雷模块在过电压计算中过于复杂。综合考虑精度和复杂度,本文采用一种新的感应雷过电压的电源模型。其由雷电流 Heidler 模块、波阻抗通道和 RLC 模块构成。测量点即为感应雷过电压输出位置,一个感应雷过电压模型只在一相线路上施加过电压,模型如图 6 所示。

感应雷模型中 RLC 元件与波阻抗通道相耦合,通过在 Heidler 输入感应雷幅值从而产生震荡衰减的满足幅值要求的感应雷波形。该感应雷电源产生的典型的感应雷过电压波形在文献[13]中已经通过对比验证其感应雷模型的可靠性。感应雷模型的相关输出波形特征如图 7 所示。

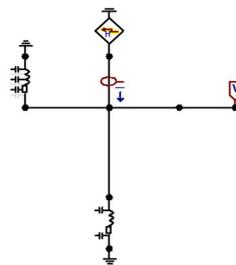


图 6 感应雷过电压模型

Figure 6 Lightning induced overvoltage model

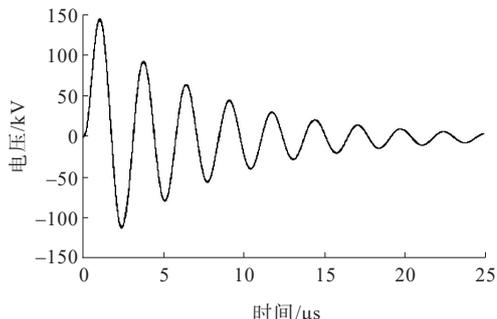


图 7 感应雷模型输出波形特征

Figure 7 Waveform characteristics of lightning induced overvoltage model output

2.4 仿真模型

35 kV 架空线路的仿真模型如图 8 所示,该模型共设 9 级杆塔,从电源到负载处杆塔顺序依次为 1、2、⋯,9。档距取 280 m。

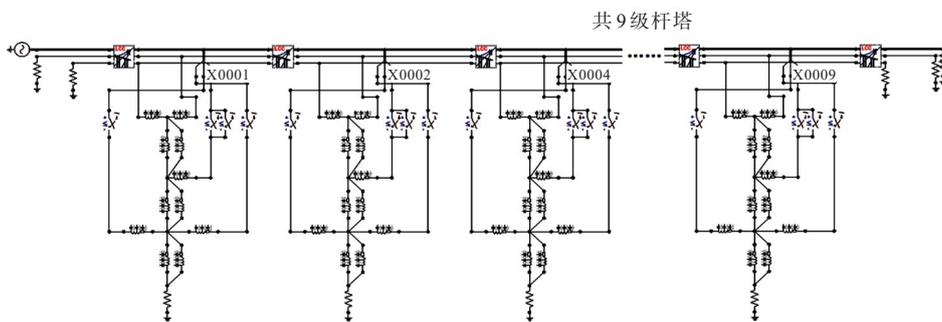


图 8 整体仿真计算模型

Figure 8 Overall simulation mode

3 仿真结果及分析

35 kV 线路雷击形式主要有:雷击杆塔、绕击导线和感应雷过电压 3 种。根据原理分析和仿真结果,绕击导线时,安装单相并联间隙的线路耐雷水平并无明显变化,需要采取其他措施提高绕击导线时的耐雷水平。

本文主要分析了在感应雷和雷击塔顶 2 种情况下,并联间隙的单相同线安装,对 35 kV 架空线路耐雷水平的影响效果。

3.1 雷击塔顶时并联间隙单相同线安装对 35 kV 线路反击耐雷水平的影响

3.1.1 无避雷线

当线路全线不安装并联间隙时,直击雷电源模型施加在 5 号杆塔顶部。当直击雷幅值为 21.9 kA

时,4号杆塔A、C相绝缘子发生闪络,此时线路发生相间短路。发生闪络的A、C两相绝缘子上的闪络电流如图9所示。杆塔的接地电阻统一设置为 $25\ \Omega$ 。

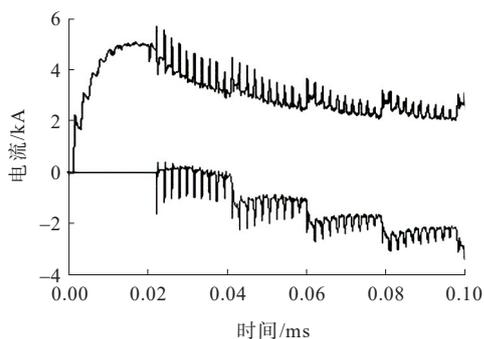


图9 A、C两相绝缘子闪络电流

Figure 9 Insulator flashover current waveforms of phase A and C

同时,不同大小的接地电阻,也是线路的耐雷水平变化重要因素。按照相同的方法,计算得到当接地电阻为 $10\ \Omega$,在不加任何防雷措施的情况下,线路的反击耐雷水平为 $23.7\ \text{kA}$ 。

在无避雷线线路模型中,最高相加装并联间隙后,根据间隙的不同放电电压的取值,计算了线路的反击耐雷水平,如图10所示。

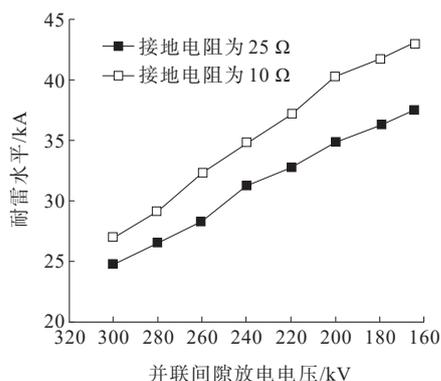


图10 单相并联间隙放电电压与线路雷击杆塔耐雷水平之间的关系

Figure 10 Relationship between discharge voltage of single-phase parallel gaps and lightning withstand level with lightning strikes on tower

由图10可知:①加入单相同线安装方式的并联间隙后,线路的反击耐雷水平均有提高。当接地电阻为 $25\ \Omega$,间隙放电电压从 $299.9\ \text{kV}$ 降至 $155.6\ \text{kV}$ 时,线路的反击耐雷水平从 $24.8\ \text{kA}$ 提升至 $37.5\ \text{kA}$,间隙放电电压取 $155.6\ \text{kV}$ 时,提升幅度最大,达到 71.2% ;当接地电阻为 $10\ \Omega$,线路的反击耐雷水平从

$26.9\ \text{kA}$ 提升至 $43.1\ \text{kA}$,间隙放电电压取 $155.6\ \text{kV}$ 时,提升幅度最大,达到 81.9% 。②间隙间距越小,放电电压值越低,线路的反击耐雷水平提高幅度越大。

3.1.2 单避雷线

线路架设单避雷线以后,接地电阻为 $25\ \Omega$ 时,在不加装并联间隙的情况下,线路反击耐雷水平达到 $50.3\ \text{kA}$ 。当接地电阻为 $10\ \Omega$ 时,线路的反击耐雷水平为 $60.3\ \text{kA}$ 。

在单避雷线线路模型中,边相加装并联间隙后,根据间隙的不同放电电压,计算了线路的反击耐雷水平,如图11所示。

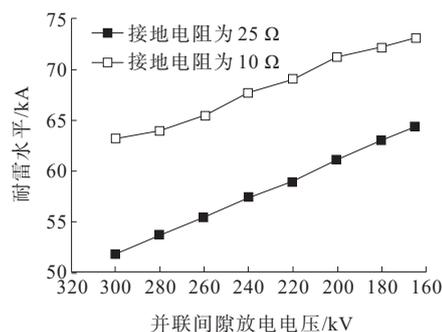


图11 采用单避雷线后单相同线并联间隙放电电压与线路反击耐雷水平之间的关系

Figure 11 Relationship between discharge voltage of single-phase parallel gaps and back flashover lightning withstand level with a single overhead ground wire

由图11可知:①加入单相同线安装方式的并联间隙后,线路的反击耐雷水平均有提高。当接地电阻为 $25\ \Omega$,间隙放电电压从 $299.9\ \text{kV}$ 降至 $155.6\ \text{kV}$ 时,线路的反击耐雷水平从 $51.9\ \text{kA}$ 提升至 $64.5\ \text{kA}$,间隙放电电压取 $155.6\ \text{kV}$ 时,提升幅度最大,达到 28.2% ;当接地电阻为 $10\ \Omega$,线路的反击耐雷水平从 $63.3\ \text{kA}$ 提升至 $73.1\ \text{kA}$,间隙放电电压取 $155.6\ \text{kV}$ 时,提升幅度最大,达到 21.2% 。②间隙间距越小,放电电压值越低,线路的反击耐雷水平提高幅度越大。

3.1.3 双避雷线

经仿真计算,在仅安装双避雷线的情况下,未安装并联间隙时,当接地电阻为 $25\ \Omega$ 时,线路反击耐雷水平为 $65.7\ \text{kA}$;当接地电阻降为 $10\ \Omega$,线路的反击耐雷水平为 $70.1\ \text{kA}$ 。

在双避雷线线路模型中,边相同线安装并联间隙后,根据间隙的不同放电电压的取值,计算了线路的反击耐雷水平,如图 12 所示。

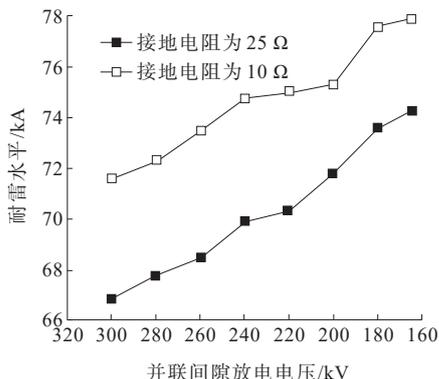


图 12 采用双避雷线后单相同线并联间隙放电电压与线路反击耐雷水平之间的关系

Figure 12 Relationship between discharge voltage of single-phase installed parallel gaps and back flashover lightning withstand level with double overhead ground wires

由图 12 可知:①在安装双避雷线的情况下,加入单相同线安装方式的并联间隙后,线路的反击耐雷水平均有提高。当接地电阻为 25 Ω,线路的反击耐雷水平从 66.9 kA 提升至 74.3 kA,间隙放电电压取 155.6 kV 时,提升幅度最大,达到 13.1%;当接地电阻为 10 Ω,线路的反击耐雷水平从 71.6 kA 提升至 77.9 kA,间隙放电电压取 155.6 kV 时,提升幅度最大,达到 11.1%。②间隙间距越小,放电电压值越低,线路的反击耐雷水平提高幅度越大。

3.2 单相并联间隙同线安装方式下线路的感应雷耐雷水平

3.2.1 无避雷线

当接地电阻为 25 Ω 时,不加任何防雷措施,通过仿真得到的感应雷耐雷水平为 50.6 kA。当接地电阻降为 10 Ω,不加任何防雷措施感应雷的耐雷水平为 53.7 kA。

在无避雷线线路模型中,施加感应雷电源时,边相加装并联间隙后,根据间隙的不同放电电压的取值,计算了 35 kV 线路的感应雷耐雷水平,如图 13 所示。

由图 13 可知:①加入单相同线安装方式的并联间隙后,线路的感应雷耐雷水平均有提高。当接地电阻为 25 Ω,线路的感应雷耐雷水平从 63.1 kA 提

升至 87.7 kA,间隙放电电压取 280 kV 时,提升幅度最大,提升了 73.3%;当接地电阻为 10 Ω,线路的感应雷耐雷水平从 68.9 kA 提升至 90.3 kA,间隙放电电压取 240 kV 时,提升幅度最大,提升了 68.1%。②间隙的放电电压与线路感应雷耐雷水平的变化不呈线性关系。当间隙放电电压在 240.0~299.9 kV 时,线路的感应雷耐雷水平提升较为明显。

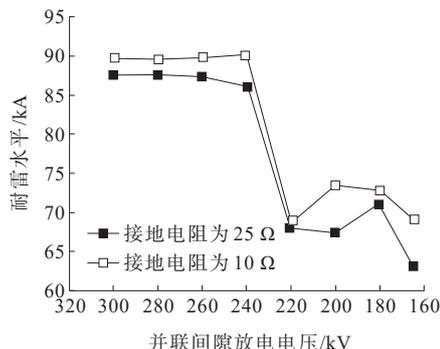


图 13 单相同线并联间隙对线路感应雷耐雷水平的影响
Figure 13 Influence of single-phase installed parallel gaps on induction lightning withstand level

3.2.2 单避雷线

当单独安装单避雷线时,通过此仿真模型可以得出,感应雷的耐雷水平可提升至 65.7 kA。和不加任何防雷措施相比,耐雷水平提升了 15.1 kA。当接地电阻由 25 Ω 降低至 10 Ω 时,感应雷的耐雷水平得到了进一步的提升。仅安装避雷线时,由初始的 65.7 kA 提升至 66.9 kA。

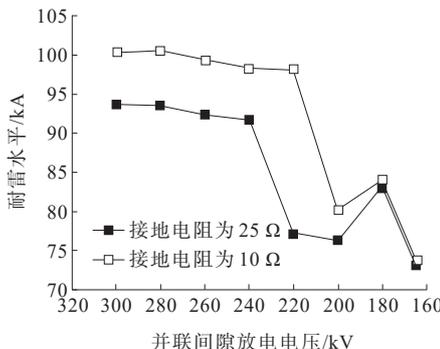


图 14 并联间隙单相同线安装方式配合单避雷线耐雷水平与放电电压关系

Figure 14 Relationship between lightning withstand level and discharge voltage of single-phase installed parallel gaps with a single overhead ground wire

由图 14 可知:①加入单相同线安装方式的并联间隙后,线路的感应雷耐雷水平均有增强。当接地

电阻为 $25\ \Omega$, 线路的感应雷耐雷水平从 $73.2\ \text{kA}$ 提升至 $93.6\ \text{kA}$, 间隙放电电压取 $299.9\ \text{kV}$ 时, 提升至 $93.6\ \text{kA}$, 提升了 42.5% ; 当接地电阻为 $10\ \Omega$, 线路的感应雷耐雷水平从 $73.6\ \text{kA}$ 提升至 $100.5\ \text{kA}$, 间隙放电电压取 $280\ \text{kV}$ 时, 提升至 $100.5\ \text{kA}$, 提升了 50.2% 。②间隙的放电电压与线路感应雷耐雷水平的变化不呈线性关系。当间隙放电电压在 $240.0\sim 299.9\ \text{kV}$ 时, 线路的感应雷耐雷水平提升较为明显。

3.2.3 双避雷线

当接地电阻为 $25\ \Omega$ 时, 将仿真模型中的单避雷线改成双避雷线, 再进行相关的仿真, 可以得出, 当不安装并联间隙, 仅架设双避雷线的时候, 耐雷水平可提升至 $75.9\ \text{kA}$ 。将接地电阻减小为 $10\ \Omega$ 以后, 仅架设双避雷线, 仿真得到的线路耐雷水平为 $83.9\ \text{kA}$ 。

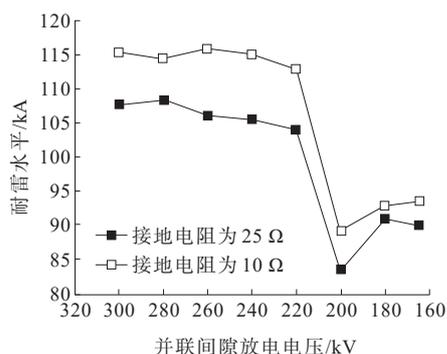


图 15 并联间隙单相同线安装方式配合双避雷线耐雷水平与放电电压关系

Figure 15 Relationship between lightning withstand level and discharge voltage of single-phase installed parallel gaps with double overhead ground wires

由图 15 可知, 加入单相同线安装方式的并联间隙后, 线路中的感应雷耐雷水平均有增强。

当接地电阻为 $25\ \Omega$, 线路的感应雷耐雷水平从 $83.5\ \text{kA}$ 提升至 $108.5\ \text{kA}$, 间隙放电电压取 $280.0\ \text{kV}$ 时, 提升至 $108.5\ \text{kA}$, 提升了 43% ; 当接地电阻为 $10\ \Omega$, 线路的感应雷耐雷水平从 $89.2\ \text{kA}$ 提升至 $116.1\ \text{kA}$, 间隙放电电压取 $260.0\ \text{kV}$ 时, 提升至 $116.1\ \text{kA}$, 提升了 50.2% 。

间隙的放电电压与线路感应雷耐雷水平的变化不呈线性关系。当间隙放电电压在 $220.0\sim 299.9\ \text{kV}$ 时, 线路的感应雷耐雷水平提升较明显。

3.3 综合分析和建议

3.3.1 并联间隙提升耐雷水平的影响因素分析

$35\ \text{kV}$ 架空线路与 $10\ \text{kV}$ 线路相比, 在防雷设置中, 部分线路架设避雷线, 部分杆塔进行了降阻处理。根据上述的仿真结果, 分别针对 2 个因素的影响效果进行了分析。

1) 避雷线对单相安装并联间隙提升耐雷水平效果的影响。

在接地电阻一定的情况下, 并联间隙在无、单、双避雷线时都能较大地提升线路的反击耐雷水平和感应雷耐雷水平。由仿真结果可知, 在无避雷线时, 反击耐雷水平和感应雷耐雷水平最高可提升至 $43.1\ \text{kA}$ 和 $69.1\ \text{kA}$, 分别提升了 81.9% 和 68.1% 。在单避雷线的配合下, 反击耐雷水平和感应雷耐雷水平最高可提升至 $73.1\ \text{kA}$ 和 $100.5\ \text{kA}$, 分别提升了 21.2% 和 50.2% 。在双避雷线的配合下, 反击耐雷水平和感应雷耐雷水平最高可提升至 $77.9\ \text{kA}$ 和 $116.1\ \text{kA}$, 分别提升了 11.1% 和 38.4% 。

可见, 单相安装并联间隙对耐雷水平的提升效果, 在无避雷线下更为显著。

2) 接地电阻对单相安装并联间隙提升耐雷水平效果的影响。

接地电阻由 $25\ \Omega$ 降至 $10\ \Omega$ 时, 反击耐雷水平和感应雷耐雷水平均有提高, 当接地电阻为 $25\ \Omega$ 时, 线路反击耐雷水平和感应雷耐雷水平最高提升至 $74.3\ \text{kA}$ 和 $108.5\ \text{kA}$, 分别提升 13.1% 和 43.0% ; 当接地电阻降为 $10\ \Omega$ 时, 线路反击耐雷水平和感应雷耐雷水平最高提升至 $77.9\ \text{kA}$ 和 $116.1\ \text{kA}$, 分别提升 11.1% 和 38.4% 。

可见, 单相安装并联间隙对耐雷水平的提升效果, 在高接地电阻下更为显著。

因而, 加装单相并联间隙的方法, 无论是单独使用还是与其他措施配合使用, 都可提升线路耐雷水平。尤其是作为独立的防雷方法, 仍然具有显著提升 $35\ \text{kV}$ 线路耐雷水平的效果。

3.3.2 并联间隙放电电压值的选择建议

1) 不同的过电压方法下, 并联间隙的放电电压(间隙距离)最优值有不同的要求。

当雷击线路杆塔时, 并联间隙的放电电压越小,

线路的反击耐雷水平越高。以本文的典型设置为例,取115.6 kV时,对应最佳间隙距离为408.8 mm,线路的耐雷水平最高。因而,对于山区等35 kV配电线路,雷击塔顶是导致跳闸的主要因素时,间隙距离可适当调至允许的较小值。

当线路遭受感应雷时,并联间隙的放电电压和线路的感应雷耐雷水平不成线性关系,放电电压值接近上限的区间内,耐雷水平较高。以本文的典型设置为例,取299.9~240.0 kV时,对应的间隙距离491.3~554.8 mm,线路的耐雷水平提升最显著。因而,建议对于平原、丘陵、城市及郊区的35 kV配电线路,感应雷过电压是导致跳闸的主要因素时,间隙放电电压值应取允许区间内的较大值。

2) 线路杆塔接地电阻的大小对单相同线安装方式的并联间隙使用效果有明显的影响。

接地电阻从25 Ω 降至10 Ω 时,35 kV线路的反击耐雷水平和感应雷耐雷水平均有所提高,提高范围分别为12.2~22.8 kA和34.8~40.2 kA。

4 结语

1) 根据35 kV配电线路的跳闸机制,为了提升线路的耐雷水平,提出了并联间隙在35 kV线路中的单相同线安装方式。即每基杆塔的同相安装并联间隙。考虑到部分35 kV线路会架设避雷线,则在边相上选择1项安装并联间隙;若无避雷线则在最高相安装并联间隙。

2) 通过仿真计算,得到了在单相同线安装并联间隙的方式,在无、单和双避雷线下,对感应雷耐雷水平最大提升68.2%、50.2%、38.4%;对直击杆塔耐雷水平最大提升81.9%、21.2%、11.1%。针对雷击形式的不同概率,得到了单相同线安装方式下并联间隙放电距离的选定原则。

3) 并联间隙造价低,不需要维护,采用单相同线的安装方式后更加适合在35 kV架空线路中推广应用。

参考文献:

[1] 夏永强,冯海超,郑智勇.10 kV绝缘导线防断线用避雷

器串联羊角间隙的距离确定方法[J].电力科学与技术学报,2019,124(1):136-141.

- XIA Yongqiang, FENG Haichao, ZHENG Zhiyong. Study on the distance determination method of angle gap in series with an anti-break lightning arrester for 10 kV insulated wires[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 136-141.
- [2] 张旭辉,唐谟懿,刘嘉怡,等.并联间隙改善35 kV绝缘子串电压分布特性研究[J].电力科学与技术学报,2016,31(3):130-135.
- ZHANG Xuhui, TANG Moyi, LIU Jiayi, et al. Voltage distribution characteristics improvement for 35 kV insulator with shunt gap[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(3): 130-135.
- [3] 杨博,孙成贤,王宁宁,等.特高压直流线路限制操作过电压用无间隙避雷器的安装方式[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):188-195.
- YANG Bo, SUN Chengxian, WANG Ningning, et al. Installation mode of gapless arrester for limiting operating overvoltage on UHVDC line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 188-195.
- [4] 刘强,周平,朱雪松,等.220 kV变电站带电作业的安全间隙试验分析[J].电力科学与技术学报,2013,28(3):77-82.
- LIU Qiang, ZHOU Ping, ZHU Xuesong, et al. Experimental research on safe gap for live working in 220 kV substations [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(3): 77-82.
- [5] 梁挺江,刘致君,焦彦军.单避雷线对10 kV配电线路防雷建设的影响[J].电测与仪表,2021,58(12):131-136.
- LIANG Tingjiang, LIU Zhijun, JIAO Yanjun. Influence of single ground wire on lightning protection construction of 10 kV distribution line[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 131-136.
- [6] 罗永志,王艳辉.配电线路雷电感应过电压的避雷器防护分析[J].电瓷避雷器,2019(1):84-88+94.
- LUO Yongzhi, WANG Yanhui. Analysis on application of surge arresters against lightning induced overvoltage of distribution lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019 (1): 84-88+94.
- [7] 杨杰,吕晓燕,赵波.复杂地形线路绕击跳闸率计算及防雷治理[J].电瓷避雷器,2018(6):74-80.
- YANG Jie, LÜ Xiaoyan, ZHAO Bo. Shielding failure flashover rate calculation and lightning protection

- improvement for transmission lines in complex terrain[J]. *Insulators and Surge Arresters*,2018(6):74-80.
- [8] 曾程.山区35 kV线路避雷线与避雷器防雷效果比较分析[D].长沙:长沙理工大学,2020.
ZENG Cheng. Comparison and analysis of lightning protection effect of lightning protection line and lightning arrester on 35 kV line in mountain area[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2020.
- [9] 李景禄,吴维宁,杨廷方,等.配电网防雷保护的分析和研究[J].高电压技术,2004,30(4):58-59.
LI Jinglu,WU Weining,YANG Tingfang,et al. Analysis of lightning protection of distribution networks[J]. *High Voltage Engineering*,2004,30(4):58-59.
- [10] 蔡昊晖,苏杰,任华,等.基于雷电冲击特性的同塔多回输电线路并联间隙配置[J].南方电网技术,2016,10(2):32-37.
CAI Haohui, SU Jie, REN Hua, et al. Parallel gaps configuration for multi-circuit transmission line on the same tower based on lightning impulse characteristics[J]. *Southern Power System Technology*,2016,10(2):32-37.
- [11] 高源,孙学东,张喆,等.10 kV架空线路雷击断线研究与防护[J].电瓷避雷器,2017(6):109-114.
GAO Yuan,SUN Xuedong,ZHANG Zhe, et al. Research and protection of 10 kV overhead line lightning broken[J]. *Insulators and Surge Arresters*,2017(6):109-114.
- [12] 张先伟,雷雨田,曾静,等.高压直流换流站直击雷防护设计及应用[J].南方电网技术,2012,6(5):27-31.
ZHANG Xianwei,LEI Yutian,ZENG Jing,et al.The design and application of direct lightning stroke shielding in the HVDC converter station[J]. *Southern Power System Technology*,2012,6(5):27-31.
- [13] 杨鑫,祝欢欢,钟森龙,等.并联间隙在10 kV配电线路的单相安装方式[J].电网技术,2020,44(8):3164-3171.
YANG Xin,ZHU Huanhuan,ZHONG Miaolong, et al. Single-phase installation method of parallel gap in 10 kV distribution line[J]. *Power System Technology*,2020,44(8):3164-3171.
- [14] 杨鑫,刘真,仇炜,等.10 kV架空绝缘导线防雷击断线用非穿刺式带间隙金属氧化物避雷器[J].电网技术,2018,42(9):3086-3092.
YANG Xin,LIU Zhen,QIU Wei,et al.An MOA with series gap and non-piercing electrode for preventing lightning breakage of 10 kV overhead insulated lines[J]. *Power System Technology*,2018,42(9):3086-3092.
- [15] 祝欢欢,杨鑫,仇炜,等.10 kV架空线路中并联间隙的单相同线安装方式[J].南方电网技术,2021,15(4):90-98.
ZHU Huanhuan,YANG Xin,QIU Wei, et al. Single-phase same-line installation mode for parallel gap in 10 kV overhead lines[J]. *Southern Power System Technology*,2021,15(4):90-98.
- [16] 马文阳,霍锋,杜志叶,等.基于ATP-EMTP的全复合材料电杆线路防雷技术研究[J].智慧电力,2023,51(2):105-110.
MA Wenyang, HUO Feng, DU Zhiye, et al. Lightning protection technology of all-composite pole line based on ATP-EMTP[J]. *Smart Power*,2023,51(2):105-110.
- [17] 杨鑫,钟森龙,祝欢欢,等.并联间隙在10 kV配电变压器防雷中的应用方法[J].高压电器,2022,58(4):179-188.
YANG Xin,ZHONG Miaolong,ZHU Huanhuan, et al. Application method of parallel gap in lightning protection of 10 kV distribution transformer[J]. *High Voltage Apparatus*,2022,58(4):179-188.
- [18] 何俊佳,蔡汉生,贺恒鑫,等.南方电网超/特高压输电线路防雷性能评估技术研究进展[J].南方电网技术,2016,10(9):1-10+29.
HE Junjia, CAI Hansheng, HE Hengxin, et al. Review on lightning performance estimation of EHV and UHV overhead transmission lines in China southern power grid [J]. *Southern Power System Technology*,2016,10(9):1-10+29.
- [19] 庄桂元,张兴,刘威,庄加才.带飞跨电容的三电平拓扑中SiC MOSFET过电压与过电流保护[J].电工技术学报,2021,36(2):341-351.
ZHUANG Guiyuan, ZHANG Xing, LIU Wei, et al. Overvoltage and overcurrent protection of SiC MOSFET in three-level topology with flying capacitor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2021,36(2):341-351.
- [20] 莫付江,陈允平,阮江军.输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J].电网技术,2004,28(21):80-84.
MO Fujiang, CHEN Yunping, RUAN Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. *Power System Technology*,2004,28(21):80-84.
- [21] 马丽叶,王海锋,卢志刚,等.计及相关性影响的增强台风灾害下配电网韧性灵活性资源规划[J].电力系统自动化,2022,46(7):60-68.
MA Liye, WANG Haifeng, LU Zhigang, et al. Resource planning for enhancing the resilience and flexibility of

- distribution networks under typhoon disasters considering correlation effects[J]. *Power System Automation*, 2022, 46(7):60-68.
- [22] 齐以年,胡兵,殷建荣,等.一起电容器过电压保护误跳闸的事故分析及优化方法[J]. *供用电*, 2021, 38(11):47-53.
QI Yinian, HU Bing, YIN Jianrong, et al. Analysis and optimization method of a capacitor overvoltage protection trip accident [J]. *Power supply and consumption*, 2021, 38(11):47-53.
- [23] 陈茂荣,卢泽军,方孖计,等.广东东莞10 kV 架空线路防雷治理技术研究[J]. *电瓷避雷器*, 2013(3):86-91.
CHEN Maorong, LU Zejun, FANG Maji, et al. Research on the technology of 10 kV overhead line lightning protection treatment in Dongguan Guangdong[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2013(3):86-91.
- [24] 郝捷,刘建华,赵泽枫,等.煤矿35 kV 输电线路防雷措施仿真分析及优化[J]. *电瓷避雷器*, 2014(4):99-102+110.
HAO Jie, LIU Jianhua, ZHAO Zefeng, et al. Simulation analysis and optimization on lightning protection measures of coal mine 35 kV transmission line[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2014(4):99-102+110.
- [25] 陈维江,孙昭英,王献丽,等.35 kV 架空送电线路防雷用并联间隙研究[J]. *电网技术*, 2007, 31(2):61-65.
CHEN Weijiang, SUN Zhaoying, WANG Xianli, et al. Study on shunt gap lightning protection for 35 kV overhead transmission lines[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(2):61-65.
- [27] 漆思怡,赵洪峰.线路杆塔的放射形接地体防雷特性优化与设计[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(1):1-6.
QI Siyi, ZHAO Hongfeng. Optimization and design of protection characteristics for radial grounding conductors of line towers[J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2022, 38(1):1-6.
- [28] 宋耐超,王瑞琦,李明明,等.多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(19):65-71.
SONG Naichao, WANG Ruiqi, LI Mingming, et al. Risk assessment of overhead transmission lines under multiple natural disasters[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(19):65-71.
-
- (上接第240页 = Continued from page 240)
- [17] 赵峰,孙明兴,郝哲峰,等.基于计算颗粒流体力学的旋风分离器结构优化[J]. *发电技术*, 2021, 42(5):637-642.
ZHAO Feng, SUN Mingxing, HAO Zhefeng, et al. Structure optimization of cyclone separator based on computational particle fluid dynamics[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(5):637-642.
- [18] 刘光启. *化学化工物性数据手册-无机卷*[M]. 北京:化学工业出版社, 2002:30-32.
LIU Guangqi. *Handbook of physical properties of chemistry and chemical engineering-inorganic volume*[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2002:30-32.
- [19] 李志强. 燃烧过程辐射换热离散坐标模型的应用[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(2):320-325.
LI Zhiqiang. Application of discrete-ordinates model to the study of radiative heat transfer[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(2):320-325.
- [20] 杨世铭,陶文铨. *传热学*[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:15-16.
YANG Shiming, TAO Wenquan. *Heat transfer*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:15-16.
- [21] 蔡文智. 基于有限元法的继电器三维稳态温度场分析[J]. *电器与能效管理技术*, 2015(10):32-36.
CAI Wenzhi. Analysis of 3D steady temperature field of relay based on finite element method[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2015(10):32-36.
- [22] 刘成柱,张猛,奚晶亮,等.基于流体-热力学耦合的大容量干式电抗器温度场研究[J]. *高压电器*, 2021, 57(4):84-89.
LIU Chengzhu, ZHANG Meng, XI Jingliang, et al. Study on temperature field of high capacity dry-type reactor based on fluid-thermodynamic coupling[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(4):84-89.