

基于绝缘横担的配电网综合防雷系统配置与实施方案

林礼健

(国网福建省电力有限公司 福建 福州 350003)

摘要: 配电网由于设计规范限制,绝缘水平低,自身雷电防护能力较弱。随着复合绝缘材料在 10 kV 配电网上的应用推广,绝缘横担通过与常规防雷措施特点对比,其优异的防雷击闪络和防工频续流能力,可实现大幅提升 10 kV 输电线路雷击防护能力。为进一步降低 10 kV 配电网雷击跳闸或断线事故的发生,提出了基于绝缘横担并结合常规防雷措施组成的区段式配网综合防雷系统,实现多层次、立体化的防雷。

关键词: 配电网; 绝缘横担; 防雷措施; 综合防雷

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)05-0051-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.05.010

Configuration and Implementation Scheme for Integrated Lightning Protection System of Distribution Network Based on Insulated Crossarm

Lin Lijian

(State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, Fujian, China)

Abstract: Due to the limitations of design specification, the distribution network has low insulation level and weak lightning protection ability. With the application and promotion of composite insulation materials in 10 kV distribution network, through the comparison of the characteristics of insulation crossarm and conventional lightning protection measures, the excellent protection ability against lightning flashover and power frequency continuous current of insulated crossarm can be realized to significantly improve the lightning protection ability of 10 kV transmission line. In order to further reduce the occurrence of lightning tripping or wire breaking accidents in 10 kV distribution network, a comprehensive lightning protection system of section distribution network based on insulated crossarm and combined with conventional lightning protection measures is proposed to realize multi-level and three-dimensional lightning protection system.

Key words: distribution network; insulated crossarm; lightning protection measures; integrated lightning protection

稳定工频续流是配电网防雷研究重点。

0 引言

配电网直接面向用户,其可靠性直接影响供用电区域内用户的用电质量,因此对配电网供电可靠性要求越来越高。统计资料表明,用户停电原因 80% 以上由配电网引起。对于配电网架空输电线路,有一半以上跳闸事故都是由雷击事故引起的^[1]。

配电网输电线路雷击事故主要是雷电击中输电线路杆塔或导线形成雷击过电压,当过电压超过了绝缘子冲击电压耐受水平时造成绝缘子雷击闪络,工频电流会沿着原有闪络通道形成稳定的工频续流,进而造成跳闸^[2]。

因此解决配电网输电线路雷击闪络或防止形成

1 常规防雷措施分析

10 kV 配电网输电线路防雷措施通常由主电网移植而来,主要有避雷针、避雷器、并联间隙和增加绝缘子片数等。无论哪种防雷措施,其核心同样是解决雷击闪络或防止形成稳定工频续流^[3]。输电线路防雷措施从功能上区分为疏通型和阻塞型。其中避雷针、避雷器和并联间隙为疏通型,增加绝缘子片数为阻塞型。

避雷针可将雷电流接闪并疏通至大地,其雷电接闪性能具备将杆塔附近绕击雷转变成反击雷的功能。在相同雷电强度下,反击雷过电压远低于绕击

雷过电压,因此避雷针可降低雷击过电压导致绝缘子闪络的概率。但配电网不具备主电网绝缘水平,反击雷过电压同样极易造成绝缘子闪络,避雷针在配电网应用效果不明显。

避雷器由于其优异的非线性材料特性,当雷击过电压形成时,内部阻抗迅速降低,将雷电流通过避雷器疏通至大地后迅速恢复至高阻抗状态,从而阻碍了工频续流的形成。但通常10 kV配电网避雷器结构尺寸较小,雷电能量吸收能力有限,较大雷电流易造成避雷器雷击损坏,且长期在线运行,其内部阀片容易老化造成短路事故^[4]。

绝缘子作为阻塞型防雷措施,通过增加线路绝缘水平提升防雷击闪络能力,同时降低工频续流形成概率。但配电网塔架尺寸较小,不能大幅度增加绝缘子片数,否则易造成导线对地悬垂过低,增加安全隐患。

综上所述,常规防雷疏通型措施虽具备一定的防护性能,但其缺陷较难弥补,类似增加绝缘子片数这种阻塞型措施会受限于线路结构空间,而采用绝缘横担替换原有铁质横担,可在有限的空间内大幅提升10 kV线路的绝缘水平^[5]。

因此,合理地设计绝缘横担绝缘距离,实现电气性能与雷电强度匹配是配电网绝缘横担设计重点。

2 配电网绝缘横担的研制

2.1 防闪络能力分析

根据电力行业标准 DL/T 5220-2005《10 kV以下架空配电线路设计技术规程》的规定,10 kV输电线路常规直线杆塔采用1片绝缘子。1片绝缘子的干弧绝缘距离为150 mm,耐受过电压不超过200 kV。

绝缘横担的设计使用,摒弃了金属横担配绝缘子的方式,而是将横担与绝缘子一体化,在有限空间里大幅度提升线路的绝缘水平^[6]。

10 kV配电网输电线路塔架高度较低,和周围物体对比不突出,因此雷电对地闪络往往不容易直接击中线路本身。但由于配电线路绝缘水平较低,雷击线路附近在线路上感应产生的过电压同样容易造成闪络跳闸事故。统计发现配电线路雷击事故大多由感应雷造成,而感应雷在配电网线路上形成的过电压通常不会超过400 kV。

若将绝缘横担设定为干弧绝缘距离750 mm,通过试验其雷电耐受过电压大于400 kV,若将绝缘横

担设定为干弧绝缘距离600 mm,通过试验其雷电耐受过电压大于350 kV,因此绝缘横担可以很好地防护感应雷对10 kV配网线路的危害。

2.2 防工频续流能力分析

根据 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》的规定,雷击跳闸率计算式为

$$N = N_L \eta (g P_1 + P_\alpha P_2) \quad (3)$$

式中: N_L 为100 km每年雷击次数; η 为建弧率; g 为击杆率; P_α 为绕击率; P_1 为超过杆塔耐雷水平雷电流概率; P_2 为超过绕击导线时耐雷水平的雷电流概率; η 为建弧率,可以采用式(4)计算:

$$\eta = 0.01(4.5E^{0.75} - 14) \quad (4)$$

式中 E 为绝缘子的平均运行电压梯度, kV/m。

如果10 kV配电系统为中性点绝缘,则有:

$$E = \frac{U_n}{2l_i} \quad (5)$$

对于有效接地系统则有:

$$E = \frac{U_n}{\sqrt{3}l_i} \quad (6)$$

式中: U_n 为线路额定电压, kV; l_i 为绝缘子的放电距离, m。

由于 U_n 为额定电压,那么建弧率主要由绝缘横担的干弧绝缘距离来决定。若将绝缘横担干弧绝缘距离设定为750 mm,对于有效接地系统的10 kV线路,可将建弧率由54%降低为4%;若将绝缘横担干弧绝缘距离设定为950 mm,可将常规10 kV输电线路的建弧率由54%降低为0。

通过增加配电网绝缘距离,即便雷击过电压造成绝缘横担闪络,但难以形成稳定的工频续流,从而阻止了线路雷击跳闸事故。

2.3 配电线路跳闸率分析

根据相关统计,10 kV配电线路由于雷击附近大地或大地上的物体产生的某一感应过电压引起的雷击跳闸次数占到总跳闸次数80%以上。

这里简述规程法计算方法,取感应过电压系数为32.1^[7]。设雷击点与配电线路的距离为 S ,若在50 m以内时雷电会直击线路, $S > 50$ m时导线上的感应过电压幅值为

$$U_i = 32.1 \times \frac{I_m h_i}{S} \quad (7)$$

式中: h_i 为导线对地平均高度,取10 m; I_m 为雷电流幅值, kA。

给定 S 和绝缘子闪络电压,可以算出引起绝缘子闪络的最小雷电流为

$$I_{\min} = \frac{U_{50\%} S}{32.1 h_i} \quad (8)$$

与配电线路相距 S 幅值超过 I_{\min} 的雷电流击于此位置均会导致绝缘子闪络。闪络概率为

$$R_T(I_{\min}) = 10^{-\frac{I_{\min}}{88}} = 10^{-\frac{U_{50\%} S}{2824.8 h_i}} \quad (9)$$

地面落雷密度 γ 按照过电压保护规程取值,取雷电日 T_d 为 40,落雷密度为 0.07。每百公里每年因感应过电压引起的绝缘子闪络次数为

$$N_S = 2 \int_0^{S_{\max}} 0.1 \gamma T_d P_T(I_{\min}) dS \\ = 0.2 \gamma T_d \int_0^{S_{\max}} 10^{-\frac{U_{50\%} S}{2824.8 h_i}} dS \quad (10)$$

式中: $S_{\max} = 32.1 h_i I_{\max} / U_{50\%}$; I_{\max} 为最大雷电流幅值。

计算得到不同 $U_{50\%}$ 绝缘子雷击跳闸次数,见表 1。

表 1 不同 $U_{50\%}$ 绝缘子对应的雷击跳闸率

绝缘子 50% 放电电压/kV	150	200	250	300	350	400
雷击跳闸率/(次·(100 km·40 雷电日) ⁻¹)	7.0	3.53	1.51	0.52	0.19	0.07

其中 10 kV 配电网常规绝缘子对应 150 kV 一列,复合绝缘横担对应 400 kV 一列,可以看出理论上采用复合绝缘横担雷击跳闸率约为采用常规绝缘子雷击跳闸率的 1%,可使配电网雷击跳闸率的大幅度降低。

3 配电网防雷绝缘横担综合防雷系统

目前输电线路防雷措施提倡差异化防雷,即针对输电线路特点进行针对性的防雷设计和改造,实现经济性和有效性的最大匹配,而不是盲目进行全线防雷改造^[8]。

通过上述分析可知配电网绝缘横担作为阻塞型配电网防雷措施,通过在有限空间内大幅度提升绝缘水平,解决了阻塞型防雷措施在配电网应用的缺陷,可达到较好的防雷效果。但雷电流难以通过绝缘横担闪络疏通泄放,必然会沿线路传播直到找

到泄放薄弱点,形成对未改造杆塔或变电站的危害隐患。因此,为了使绝缘横担的应用实践性更科学合理,结合经济性和有效性,设计一种基于绝缘横担的综合防雷系统。

3.1 配电网绝缘横担综合防雷系统思路

在进行综合防雷设计时,通过对线路历史雷击数据和地理气候对杆塔雷击影响等因素进行统计分析,选出易遭雷击危害的线路区段。将上述区段作为综合防雷整治的区段,在选定区段中,将所有杆塔进行绝缘横担改造,并配合区段端头杆塔加装避雷器作为雷电流侵入区段外之前的泄放通道。如区段内杆塔在历史数据中曾遭受大电流雷击危害,应加装塔顶避雷波阻器,在雷电流侵入输电线路前削减其雷电流幅值,减轻雷电对绝缘横担的冲击。实现区段内雷击能量综合处理,输电线路不续流、不跳闸,同时也不影响区段外的线路或变电站。

以 10 基杆塔的区段为例,综合防雷系统配置方式如表 2。

3.2 配电网绝缘横担综合防雷系统设计方法

10 kV 绝缘横担综合防雷系统具体设计方式如图 1。

3.2.1 绝缘横担选择

绝缘横担采用圆形实心玻璃纤维棒作为基材,两端压接金具。金具具备紧固和挂线功能,外层采用抗紫外线硅橡胶包覆工艺。

具体结构参数如下:

- 1) 芯棒截面直径为 50 ~ 60 mm;
- 2) 硅橡胶厚度 ≥ 3.5 mm;
- 3) 干弧绝缘距离为 450 ~ 950 mm。

其中,当干弧绝缘距离为 450 ~ 550 mm 时,芯棒截面直径采用 50 mm;当干弧绝缘距离为 550 ~ 650 mm 时,芯棒截面直径采用 55 mm;当干弧绝缘距离大于 650 mm 时,芯棒截面直径采用 60 mm。

3.2.2 区段绝缘配合

绝缘横担的干弧绝缘距离是区段防雷效果的关键,为了实现经济性和有效性的最大匹配,区段内绝缘横担的干弧绝缘距离可根据配电线路重要性和跳闸率允许值进行配置。配置方案见表 3。

表 2 10 基杆塔区段配网绝缘横担综合防雷系统配置方式

塔号	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号
杆塔分类	端头塔	普通塔	普通塔	普通塔	易遭大电流雷击塔	普通塔	普通塔	普通塔	普通塔	端头塔
设备配置	避雷器 + 绝缘横担	绝缘横担	绝缘横担	绝缘横担	避雷波阻器 + 绝缘横担	绝缘横担	绝缘横担	绝缘横担	绝缘横担	避雷器 + 绝缘横担

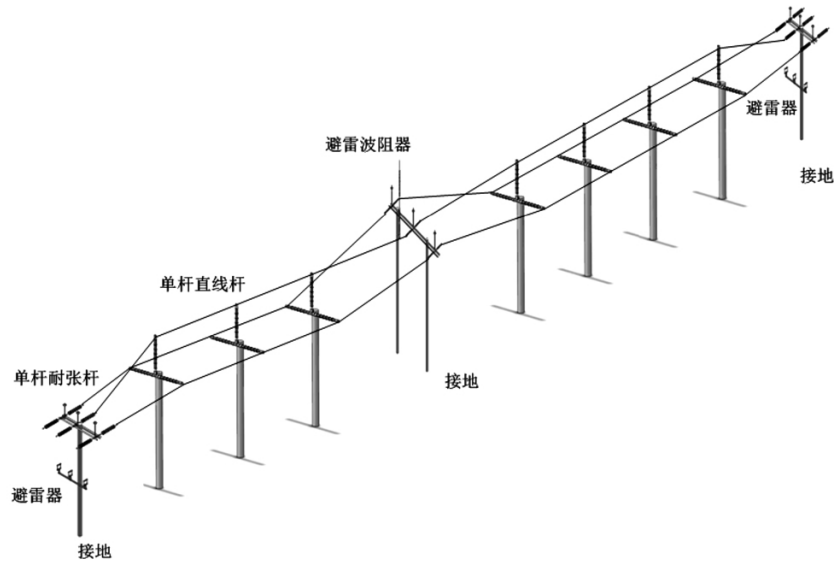


图1 10 kV 绝缘横担综合防雷系统

表3 区段绝缘横担绝缘强度配置方案表

线路类别	重要线路	次重要线路	常规线路
跳闸率允许值/ (次·(100 km·a) ⁻¹)	0	≤0.5	≤2
跳闸率理论值/ (次·(100 km·a) ⁻¹)	0	0.1~0.5	0.5~2
雷电冲击耐受 电压/kV	550	400~350	300~250
绝缘横担干弧绝缘 距离/mm	950	750~600	550~450

对拟改造配电线路的重要性进行评估,确定其重要等级。如为重要线路,跳闸率允许值为0,则绝缘横担的干弧绝缘距离需950 mm以上,对于10 kV配电网线路可将建弧率控制为0,则雷击时不会建立起稳定工频续流。如为次重要线路或常规线路,则根据线路历史雷击危害程度,在表3范围内选择相应干弧绝缘距离的绝缘横担进行配置。

3.2.3 区段端头避雷器

在区段端头杆塔加装线路避雷器作为雷电泄放通道,进一步保证区段内雷电流不会对区段外线路造成危害。

避雷器采用带间隙氧化锌避雷器,避免避雷器阀片老化造成短路事故,主要参数如下:

- 1) 额定电压为17 kV;
- 2) 标称放电电流为5 kA;
- 3) 最大雷电冲击残压(8/20 μs)为50 kV。

由于配电网避雷器雷电吸收能量有限,为防止雷电冲击损坏避雷器,将避雷器设计在区段两端,当雷击区段内输电线路时,一方面区段内的绝缘横担

防止雷击闪络或续流;另一方面雷电流在线路传播过程中,导线的固有电阻以及雷电流的电磁辐射效应因素使雷电流不断衰减,可降低因通流量的限制造成避雷器损坏的风险。

3.2.4 避雷波阻器

避雷波阻器作为一种塔顶式针式防雷设备,遵循雷击先导形成原理,安装方式灵活,通常选择历史数据统计中易遭受大电流直击雷危害的杆塔安装,将雷电接闪至装置。由于杆塔进行了强绝缘改造并具有良好的接地泄放通道,可避免接闪的雷电对线路造成危害。

避雷波阻器将杆塔周围雷击吸引至针体,并提供良好的接地通道,同时利用避雷波阻器针体内部多阶滤波装置的滤波作用,降低雷电波前沿陡度,从而降低雷击过电压,进而降低大电流雷电对绝缘横担的冲击和雷击闪络风险。

4 结 语

上面分析了10 kV配电网输电线路雷电防护性能,总结了配电线路防雷重点,结合常规防雷措施特点和绝缘横担雷电防护机理,提出以绝缘横担为基础的综合防雷系统实施技术方案,分析了绝缘横担的应用对于提升10 kV配电线路雷电防护性能的有效性。

参考文献

- [1] 范明天. 中国配电网面临的新形势及其发展思路[J].

供用电 2013(1):1-5.

[2] 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.

[3] 段绪金,齐飞,叶会生,等. 配网防雷现状与治理措施研究[J]. 电气应用 2015(S1):17-20.

[4] 黄清社,徐奔,彭利强,等. 10 kV 架空绝缘导线防雷保护的措施研究[J]. 高压电器 2010, 46(12):32-35.

[5] 帅玲,毕涛,李荣兵. 有机材料在 10KV 绝缘横担上的应用与发展[J]. 山东工业技术 2014(14):93-93.

[6] 戴波涛,方向,田维. 10 kV 配电线路绝缘横担防雷实

践研究[J]. 湖南电力 2017, 37(S2):102-105.

[7] 何金良,曾嵘. 配电线路雷电防护[M]. 北京:清华大学出版社 2013:160-161.

[8] 韩晋平,王晓丰,马心良,等. 10 kV 架空绝缘导线雷电过电压与防雷综合措施研究[J]. 高电压技术 2008, 34(11):2395-2399.

作者简介:

林礼健(1971),硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力与新能源。

(收稿日期:2019-06-10)

(上接第16页)

参考文献

[1] 苏盛,吴长江,马钧,等. 基于攻击方视角的电力 CPS 网络攻击模式分析[J]. 电网技术:2014, 38(11):3115-3120.

[2] 童晓阳,王晓茹. 乌克兰停电事件引起的网络攻击与电网信息安全防范思考[J]. 电力系统自动化:2016, 40(7):144-148.

[3] 陆佳政,张红先,方针,等. 湖南电力系统冰灾监测结果及其分析[J]. 电力系统保护与控制 2009, 37(12):99-105.

[4] Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of Small-world Networks[J]. Nature 1998, 393(6684):440-442.

[5] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science 1999, 286(5439):509-512.

[6] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic Cascade of Failures in Interdependent Networks[J]. Nature, 2010, 464(7291):1025-1028.

[7] Albrecht J, Berens D G, Jaroszewicz B, et al. Correlated Loss of Ecosystem Services in Coupled Mutualistic Networks[J]. Nature Communications, 2014, 5:3810.

[8] 孟令中,陆民燕,黄百乔,等. 网络控制系统的连锁失效影响分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(3):353-356.

[9] Sridhar S, Hahn A, Govindarasu M. Cyber-Physical System Security for the Electric Power Grid[J]. Proceedings of the IEEE 2012, 100(1):210-224.

[10] 冀星沛,王波,董朝阳,等. 电力信息-物理相互依存网络脆弱性评估及加边保护策略[J]. 电网技术, 2016, 40(6):1867-1873.

[11] 冀星沛. 基于相互依存网络理论的电力信息-物理系统结构脆弱性研究[D]. 武汉:武汉大学 2016.

[12] 董政呈,方彦军,田猛. 相互依存网络抗毁性研究综

述[J]. 复杂系统与复杂性科学 2017, 14(3):30-44.

[13] 王亚非,胡四全,马力. 基于 GPRS 网络的调度备用通道[J]. 电力系统保护与控制 2009, 37(16):80-83.

[14] 郭伟. 抗干扰、自适应、自组织、自恢复通信网技术[J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(S3):304-308.

[15] Gao J, Li D, Havlin S. From A Single Network to A Network of Networks[J]. National Science Review 2014, 1(3):346-356.

[16] Parshani R, Rozenblat C, Jetri D, et al. Inter-similarity between Coupled Networks[J]. EPL, 2010, 92(6):68002.

[17] Boccaletti S, Bianconi G, Criado R, et al. The Structure and Dynamics of Multilayer Networks[J]. Physical Reports 2014, 544(1):1-122.

[18] Bashan A, Parshani R, Havlin S. Percolation in Networks Composed of Connectivity and Dependency Links[J]. Physical Review E 2011, 83(5):05112.

[19] 胡海波,王林. 幂律分布研究简史[J]. 物理, 2005(12):889-896.

[20] National Institute for Standards and Technology(NIST). Guidelines for Smart Grid Cyber Security: Vol. 3 Supportive Analyses and References: NISTIR 7628[S] 2010.

[21] 汤奕,陈倩,李梦雅,等. 电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17):59-69.

作者简介:

罗紫航(1997),本科生,研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析;

关翔友(1994),硕士研究生,研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析;

魏震波(1978),博士,副教授,研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析与控制及电力市场。

(收稿日期:2019-07-09)