

基于成都电网高压输电线路雷击跳闸的研究与分析

黄江龙,李倩竹

(国网成都供电公司检修分公司,四川 成都 610056)

摘要: 高压输电线路的稳定运行与电网的安全可靠息息相关。雷击跳闸严重影响着高压输电线路的可靠运行,破坏电网的稳定。为降低成都电网高压输电线路的雷击跳闸率,确保成都电网的稳定运行,以成都电网高压输电线路2005—2014年的雷击跳闸事故为例,统计分析其雷击跳闸规律,研究造成输电线路雷击跳闸的主要原因,并得到以下结论:成都地区输电线路雷击故障主要集中在岷江—沱江源山区、沱江—龙泉山交界区及成都城乡结合部等区域;成都电网雷电易击区的形成原因与杆塔所处的地理位置及杆塔本身的耐雷水平有关;针对不同的雷电易击区,采取相应的防雷措施,能有效降低高压输电线路的雷击跳闸率。

关键词: 输电线路;雷击跳闸;成都电网;耐雷水平

Abstract: The stable operation of HV transmission line has close relations to the safety and reliability of power grid. The tripping caused by lightning stroke has severe effects on the reliable operation of HV transmission lines, and it can destroy the stability of power grid. In order to reduce the lightning trip-out rate of HV transmission lines in Chengdu power grid and to guarantee its stable operation, taking the tripping accidents caused by lightning stroke of HV transmission lines in Chengdu power grid from 2005 to 2014 for example, the tripping rules of these transmission lines are analyzed, and the main reasons for lightning stroke tripping are studied. The results show that the areas which are easily struck by the lightning are Minjiang-Tuojiang source mountainous area, Tuojiang-Longquan mountain junction, rural-urban fringe zone and so on. The reasons of these lightning attachment areas relate to the geographic position and lightning withstand level of towers. Aiming at different lightning attachment areas, the corresponding methods should be adopted to reduce the lightning trip-out rate of HV transmission lines efficiently.

Key words: transmission line; lightning stroke tripping; Chengdu power grid; lightning withstand level

中图分类号: TM726.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-27-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.007

0 引言

输电线路故障是主要的电网事故之一,影响电网的稳定运行。高压输电线路绵延数里,跨越之地复杂多变^[1-3],并长期暴露于恶劣的自然环境中,遭受暴雨、雷电、冰雪等各种恶劣自然气候的侵蚀,这些都严重影响线路的可靠稳定运行。雷击是引起输电线路跳闸的主要因素^[4-5]。统计分析显示,70%以上的输电线路事故由雷击造成。雷电灾害作为一种自然灾害,它的发展和分布规律受到所处区域环境的影响^[6-7]。环境因素包括海拔高度、区域气候、地貌特征、人类活动等。不同的环境因素对输电线路的雷击跳闸有着不同程度的影响。例如山区的雷击跳闸概率大于平原地区^[8-10]。这是由于山区地势陡峭,磁场分布不均匀,同时海拔高的地方曲

率大,更易遭受雷击;另一方面,对于同样的防雷措施,因地貌因素的不同,山区输电线路很难像平原一样实施,并且山区的雷电活动程度高于平原地区,所以山区输电线路的雷击跳闸率远远大于平原地区。此外,杆塔本身的耐雷水平也在一定程度上影响着输电线路的雷击跳闸率。

随着电网的不断发展与壮大,输电线路运行的可靠性与国民经济的发展息息相关。为了有效地减少高压输电线路的雷击跳闸率,提高电网的可靠稳定性,高压输电线路雷击跳闸事故的分析及探讨成为保障输电线路稳定运行的研究热点,并为国民经济的发展、生产及生活提供了强有力的可靠保障。

成都平原地势辽阔,地理环境复杂多变,不同的地理环境严重影响着输电线路的雷击跳闸率。结合成都地区高压输电线路的雷击跳闸情况,详细分析了成都地区110 kV和220 kV输电线路在2005—2014

表 1 成都地区 2005—2014 年的雷击跳闸统计结果

年份	雷电个数/个	地闪密度/(次·km ⁻²)	220 kV 雷击次数/次	110 kV 雷击次数/次	雷击总数/次
2005	693 56	3.854 278	2	0	2
2006	967 32	5.375 628	4	0	4
2007	641 83	3.566 802	1	1	2
2008	106 271	5.905 734	0	1	1
2009	124 328	6.909 205	2	0	2
2010	101 093	5.617 98	3	4	7
2011	117 506	6.530 089	6	10	16
2012	423 00	2.350 71	3	0	3
2013	103 858	5.771 638	5	7	12
2014	253 70	1.409 87	1	2	3

年的雷击跳闸事例。通过对这些雷击跳闸数据的统计分析,总结出成都电网易遭受雷击的片区,并对这些地区杆塔易受雷击的原因进行分析,提出合理可行的防雷措施^[11-16]。最后,将采取防雷措施前后的输电线路雷击跳闸率进行对比,分析防雷措施的有效性,为成都电网输电线路雷击跳闸的分析提供了一种可靠有效的研究思路及方法。

1 输电线路雷击跳闸的主要因素分析

雷电的发生具有随机性,其分布特点也不规律。研究雷击跳闸的分布规律,并采取相应的防雷措施,能够更好地避免输电线路雷击跳闸,确保电网稳定。数据统计显示,高压输电线路雷击跳闸的概率与其所处的地理环境及其本身的耐雷水平有关。

1.1 地闪密度对雷击跳闸的影响

大量研究表明,地闪密度与雷击跳闸概率有着密切联系。地闪密度可用雷电定位系统测量的雷电个数除以区域面积得到,反映了一个地方遭受雷击可能性的大小,是雷击风险评估的重要技术参数之一,也是开展防雷工作的重要依据。成都地区 2005—2014 年的雷击跳闸相关数据及每年的地闪密度大小如表 1 所示。

将 2005—2014 年成都电网 110 kV 和 220 kV 输电线路的雷击跳闸点叠加到成都 2005—2014 年平均地闪密度分布图上,如图 1 所示。

从图 1 可以看出,地闪密度大的区域(年地平均闪密度在 5~7 次/km²),雷击跳闸点分布较多;而地闪密度小的区域,雷击跳闸点相对较少。充分

说明:地闪密度是决定输电线路雷击跳闸率的主要因素之一,区域地闪密度越大,其输电线路雷击跳闸的次数越多。

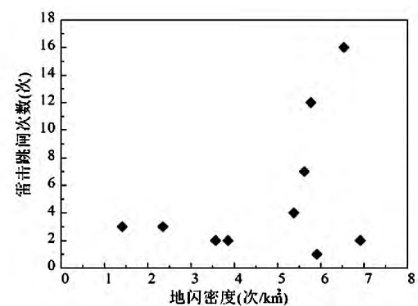


图 1 雷击跳闸与地闪密度的对应关系

1.2 地貌地质对雷击跳闸的影响

输电线路在整个电网中负责电能的输送与分配,跨越线路长,历经复杂多变的地形、地质及恶劣的气候条件。根据统计结果,在成都地区历年的雷击事故中,有超过 2/3 的雷击事故,尤其是 220 kV 线路的故障,发生在有河流起源的山区和河流上游冲积平原。这与高压输电线路所处区域的地貌地质条件有着密切关系。有河流起源的山区通常会有水电站或大的水库区,导致该区域湿度明显高于其他地区;同时由于大山阻隔,暖、冷空气往往在迎风坡交替,极易诱发强降雨,因此,这些地域的雷雨概率和地闪密度明显高于其他地域。由于山峦起伏,造成线路杆塔之间档距往往高于平原地区,多出现大档距(1 000 m 左右)的点位,这些点位档距中央的导线对地距离多在 600 m 以上,使得其绕击耐雷区间极大(10~60 kA),从而导致这些地方输电线路绕击的概率增大。

随着河流向平原辐射,出现了大面积的上游冲

积平原和河间冲积平原。由于河流冲刷,这些地方地层很薄(20~40 cm之间),土壤层之下就是由沙和石头混杂的沙夹石层,土壤电阻率(一般在800~1500 Ω/m 之间)明显高于其他平原地区,因此处于这些区域的输电线路杆塔接地电阻值明显偏高,导致输电线路的反击雷击跳闸率增高。

1.3 杆塔耐雷水平对雷击跳闸的影响

除了地闪密度及地貌形态因素以外,影响输电线路雷击跳闸的因素还有很多,例如杆塔的耐雷水平。耐雷水平越高,则发生雷击跳闸的概率就越低。而杆塔的耐雷水平与杆塔高度、绝缘配置、绝缘劣化程度等有着密切联系。

大量研究表明,输电线路跳闸的直接原因与杆塔的高度和绝缘配置相关。同一地域、同一绝缘配置的情况下,杆塔越高其反击耐雷水平越低。导线离地面距离越远,地面屏蔽作用越弱,其绕击耐雷区间越大,越易遭受绕击。例如在某些城乡结合部区域,线路迁改工程导致杆塔的高度增加;然而绝缘配置并没有因为杆塔的升高而相应提高,因此造成这些点位的反击耐雷水平和绕击耐雷水平都大幅低于平均水平,成为雷电易击区。同样地,杆塔本身的绝缘配置也会影响其耐雷水平。例如,绝缘子材料的选择、避雷器的安装,都在很大程度上影响杆塔的耐雷水平。此外,在杆塔的设计中,有时适当增加绝缘子长度是必要的;然而绝缘子长度的增加,必然会减少绝缘子串对杆塔的风偏裕度,增大了绝缘子串发生风偏跳闸的概率。为了解决线路防雷和防风偏两者统一的问题,在增加绝缘子长度的同时,需增加相应的重锤片,因此选择合适的绝缘子、制定合理的杆塔设计方案及提高杆塔的绝缘配置,对提高杆塔的耐雷水平、降低雷击跳闸率具有重要意义。与此同时,杆塔的绝缘子家族性缺陷诱发劣化程度越高,其耐雷水平越低,越容易遭受雷击。

综上所述,输电线路的雷击故障原因是多种多样的。为了切实有效降低线路的雷击跳闸率,电力运行、科研、试验单位一直致力于研究探索高压线路的防雷新方法、新手段,并根据具体情况制定出经济有效的防雷措施。值得注意的是,在进行输电线路防雷设计、确定线路防雷方式时,应综合考虑系统的运行方式、线路的电压等级和重要程度、线路经过地区雷电活动的强弱、地形地貌特点及土壤电阻率的高低等自然条件,参考当地原有线路的运行经验,根

据技术经济比较的结果,采取合理的防雷措施。

2 成都电网输电线路雷击跳闸分析

成都平原具有丰富的地貌形态,从西到东,地形分为山地、平原、丘陵3个部分,各高压杆塔所在的地形差别很大。成都西部,是高峻的龙门山和邛崃山地,这里山峰众多,位于山区的高压杆塔,土壤电阻率大,易发生线路反击雷击跳闸。成都市大部分区域位于岷江中游地区,河流众多,大小河流共有40多条,河流区域落雷密度大,杆塔易遭受雷击。此外,成都部分地区的高压杆塔采用红星绝缘子,耐雷水平达不到要求,不能有效防雷。

2.1 成都电网雷击跳闸情况统计

统计分析成都地区2005—2014年110 kV和220 kV高压输电线路的雷击跳闸情况,总结出成都地区高压输电线路的雷击跳闸分布规律,如图2所示。

观察图2中的雷击跳闸点,可以看出,2005—2014年成都地区高压输电线路的雷击跳闸事故主要发生在:1)岷江—沱江源山区;2)岷江—沱江上游冲击平原区;3)沱江—龙泉山交界区;4)成都城乡结合区;5)金马河—西河中间区;6)西岭大川河源山区;7)邛崃市郊丘陵区;8)蒲江市郊丘陵区。

2.2 雷击跳闸的原因分析

根据图2中成都地区高压输电线路的雷击跳闸分布规律,对雷电易击地带形成的原因进行详细分析,得出以下结论:岷江—沱江源山区和西岭大川河源山区落雷密度大,导线暴露易发生绕击故障;岷江—沱江上游冲击平原和金马河—西河中间区土壤沙石化严重,电阻率高,易发生雷电反击故障;成都城乡结合区线路杆塔升高后绝缘配置未相应升高,导致其耐雷水平普遍偏低,易遭受雷击;沱江—龙泉山交接区雷电活动高于一般地区,同时由于绝缘子劣化严重,耐雷水平偏低,易发生雷击跳闸;邛崃、蒲江丘陵区则偶尔出现雷击故障。

根据以上线路雷击跳闸的分布规律,可将成都电网高压输电线路的雷电易击区分为如下5种类型:1)河流源头山区(易发生绕击);2)河流上游冲击平原(高接地电阻率易发生反击);3)大城市城乡结合部(不合理改造高杆塔);4)沿河平原山区(交接地带绝缘子劣化严重);5)丘陵地区(零星故障)。

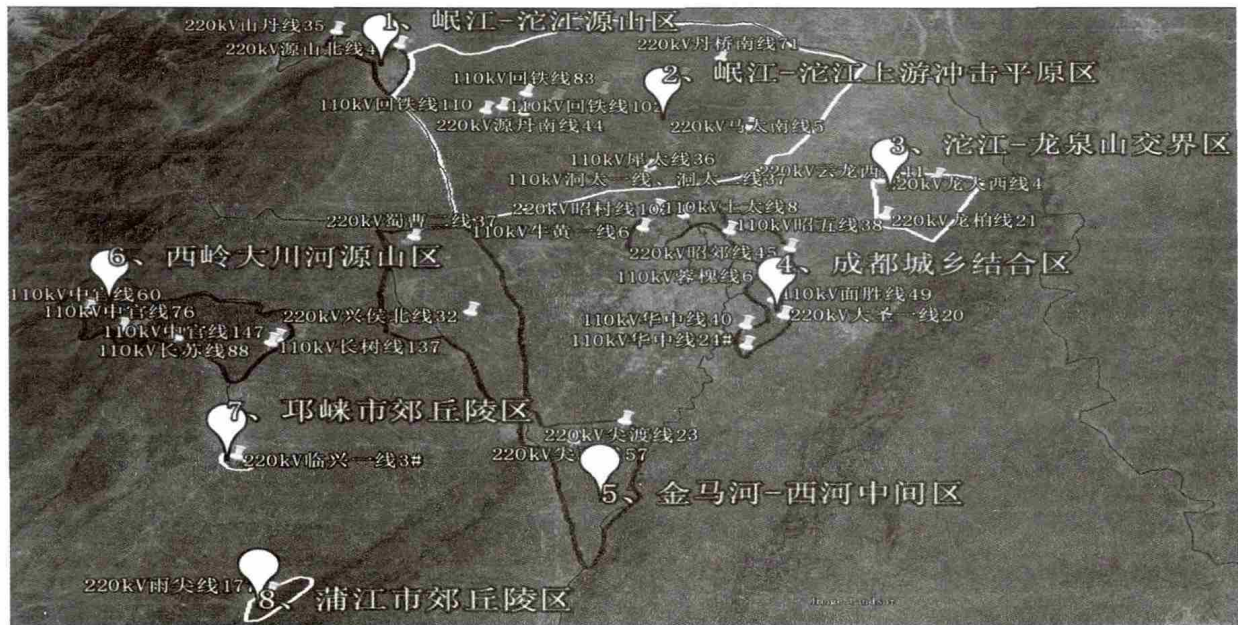


图2 2005—2014年成都地区110kV和220kV输电线路的雷击跳闸点位分布情况

3 降低雷击跳闸的防雷措施分析

为了更有效地避免成都地区高压输电线路的雷击跳闸事故,应研究并采取合理可行的防雷措施。针对成都地区输电线路雷击跳闸的特点,提出多种减少雷击跳闸事故的对策。

3.1 降低接地电阻

降低接地电阻能够显著提高线路的反击耐雷水平,降低反击跳闸率。岷江—沱江上游冲击平原区、金马河—西河中间区应当重点采取整治接地装置、降低接地电阻的方式开展防雷工作,对以上区域杆塔进行深入整治接地装置,将接地电阻控制在 $10\ \Omega$ 以内,可有效降低该区域的雷击故障次数。

3.2 安装避雷装置

避雷器是有效的雷电流泄放装置,能确保输电线路在遭受雷击后将雷电流疏导到相邻杆塔同时泄放,防止雷击后线路发生跳闸事故;但是线路避雷器价格昂贵,保护范围较小,只能确保安装的杆塔不发生雷击故障,因此应当在相邻前后共三基杆塔上同时安装。为了有效防雷,应对处于岷江—沱江源山区、沱江—龙泉山交界区、成都城乡结合区及西岭大川河源山区的线路选取高杆塔安装避雷器。

3.3 整治绝缘子

成都电网部分地区的杆塔由于所使用的绝缘子出现了家族性劣化缺陷,应更换绝缘水平较高的优质绝缘子;同时应加强带电检零,定期观测绝缘子耐

雷水平的变化,确保有效防雷。

在邛崃、蒲江市郊丘陵区,可采用整治绝缘子的方式来提高杆塔的耐雷水平。

3.4 成都地区输电线路的防雷措施效果分析

根据上述分析,结合成都电网各雷电易击区的自身情况,成都供电公司输电运检工区从2012年开始有针对性地成都电网各雷电易击区进行防雷综合整治,使雷电跳闸率出现了不同程度的下降,整治结果如表2所示。

对比表2中2010—2012年度和2012—2014年度的雷击跳闸数据,可以明显看出:岷江—沱江源山区、沱江—龙泉山交界区及西岭大川河源山区在雷电易击点位加装避雷器后,雷击故障大幅下降,基本实现了零故障;岷江—沱江上游冲击平原区、金马河—西河中间区由于土质问题,虽然经过接地装置的不断整治,但是效果不理想,有明显的反弹迹象;成都城乡结合区通过不断地进行避雷器整治,已经能控制雷击故障的增加趋势,但是这种控制力十分有限;邛崃、蒲江市郊丘陵区的线路雷击显然具有随机性,只能通过提高绝缘性能来提高其耐雷水平。

3.5 其他防雷措施分析

实际工作中,适当增加绝缘子片数,加强线路绝缘水平,亦可达到减少雷击跳闸的目的。杆塔的绕击耐雷水平与其50%放电电压密切相关,其表达式是 $I = 2U_{50\%} / Z$ 。式中: I 为能引起绕击的最小雷电流; Z 为线路波阻抗。根据该公式可以看出,增加线路绝缘(如增加绝缘子片数)对减少绕击率是有利的;

表2 成都地区输电线路防雷整治效果对比表

片区	整治措施	2010—2012年跳闸次数	2012—2014年跳闸次数	同比
1. 岷江—沱江源山区	加装避雷器	3	0	-100.00%
2. 岷江—沱江上游冲击平原区	整治接地电阻	7	4	-42.86%
3. 沱江—龙泉山交界区	加装避雷器	2	1	-50.00%
4. 成都城乡结合区	加装避雷器	6	6	0.00%
5. 金马河—西河中间区	整治接地电阻	2	3	50.00%
6. 西岭大川河源山区	加装避雷器	4	3	-25.00%
7. 邛崃市郊丘陵区	整治绝缘子	0	1	100.00%
8. 蒲江市郊丘陵区	整治绝缘子	1	0	-100.00%

然而必须注意的是,加强线路绝缘水平时应考虑加强绝缘后线路的绝缘配合和安全距离的问题;因为增加绝缘子片数,导致绝缘子串长度增加,因此需要重新校核空气间隙。

除了降低接地电阻、安装线路避雷器和加强绝缘水平外,还有一些措施可以对输电线路的防雷性能起到改善作用,如增加耦合地线和采用侧向避雷针等。

增加耦合地线的作用主要是提高线路的反击耐雷水平、降低反击跳闸率,因此耦合地线主要应用在接地电阻较高的线路。耦合地线提高耐雷水平的机理包括两方面:

1) 耦合地线可以增加导线和地线间的耦合作用,导致雷击塔顶时在导线上产生更高的感应电压,从而减小绝缘子串承受的冲击电压。

2) 耦合地线可以降低杆塔的分流系数,特别是在接地电阻较高时,可使雷电流易于通过邻近杆塔的接地装置散流,从而降低塔顶电位。但从总体效果来看,采用耦合地线对改善耐雷水平的效果不太明显,与增加两片绝缘子的作用基本相同;而从增加耦合地线的经济性来看,增加耦合地线的费用包括增加耦合地线的材料和施工费用、杆塔基础和重量增加的费用等,其费用远远超过增加绝缘子片数等措施,因此在线路防雷改进时,需综合比较各种方法的技术经济比,选取最合适的方法增加绝缘水平。

减小边导线保护角亦可有效降低绕击概率。在山区可采用负保护角塔,这样会实现较好的避雷效果。在塔上横担处加装避雷针可有效屏蔽线路的边导线,使绕击雷击在侧向避雷针上,从而减少雷击次数。

此外,为了降低雷电跳闸率,还应不断完善输电管理工作,总结雷击跳闸规律,提出相应的防雷措施,提高输电线路运行的可靠性;同时,还需加强新型导线及绝缘子的研究,进一步提高输电线路的耐雷水平。

4 结 论

依据成都电网高压输电线路2005—2014年的雷击跳闸数据,对成都电网高压输电线路的雷击跳闸规律进行研究,分析影响成都地区输电线路雷击跳闸的各类因素,并提出相应的提高杆塔耐雷水平的措施,得到以下结论:

1) 成都电网高压输电线路的雷电易击区为:①岷江—沱江源山区;②岷江—沱江上游冲击平原区;③沱江—龙泉山交界区;④成都城乡结合区;⑤金马河—西河中间区;⑥西岭大川河源山区;⑦邛崃市郊丘陵区;⑧蒲江市郊丘陵区。

2) 影响成都电网高压输电线路雷击跳闸的因素与杆塔所处的地理位置及杆塔本身的耐雷水平有关,研究表明,位于山区、大川河流上游冲积平原区的杆塔及杆塔高度较高而绝缘配置较低的杆塔更易遭受雷击。

3) 根据成都电网各地区的杆塔雷击跳闸情况,可采取降低接地电阻、安装避雷装置及加强线路绝缘水平等措施来进一步提高杆塔的耐雷水平,降低线路的雷击跳闸率,确保成都电网的稳定运行。

参考文献

[1] 黄中华,韩民晓,王伟. 输电线路雷击跳闸原因分析与防雷措施介绍[J]. 电工电气, 2012(4): 62-64.

[2] 孙鹁鸿,任晋旗,严萍,等. 架空输电线路雷击跳闸率影响因素研究现状[J]. 高电压技术, 2004(12): 12-14.

[3] 李川. 架空输电线路雷击跳闸分析及防雷探讨[J]. 广东科技, 2011(8): 56-58.

[4] 张仕名,张先怡,许安,等. 220 kV 输电线路防绕击侧防护效果研究[J]. 四川电力技术, 2013, 36(4): 75-79.

[5] 吴玉麟,高建勇. 高压输电线路雷击跳闸率的计算[J]. 四川电力技术, 2008, 31(3): 16-18.

[6] 童杭伟,金祖山,赵伟,等. 影响输电线路雷击跳闸的环境因素分析[J]. 浙江电力, 2013(5): 1-3, 25.

[7] 童杭伟,李思南,杨立川. 以雷电日和落雷密度为参数的输电线路雷击跳闸率计算的对比分析[J]. 浙江电力, 2006(1): 48-49, 68.

[8] 金祖山,吴健儿. 220 kV 同塔双回输电线路雷击跳闸原因分析[J]. 浙江电力, 2009(1): 51-53.

[9] 毛峰. 山区输电线路防雷相关问题的探讨[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.

[10] 植芝豹. 柳州电网输电线路防雷研究与实践[D]. 南宁: 广西大学, 2005.

[11] 贺含峰,张仕名. 四川 500 kV 线路雷击跳闸情况分析

析[J]. 四川电力技术, 2003, 26(1): 1-5.

[12] 金祖山,胡文堂,龚坚刚,等. 浙江电网降低高压输电线路雷击跳闸率的措施分析[J]. 浙江电力, 2010(11): 1-5.

[13] 郭志红,程学启,李树静,等. 山东省输电线路雷击跳闸分析及反措[J]. 高电压技术, 2001(6): 66-69.

[14] 刘家芳,许飞. 超高压输电线路雷击跳闸典型故障分析[J]. 高电压技术, 2006(4): 114-115.

[15] 张志劲,司马文霞,蒋兴良,等. 超/特高压输电线路雷电绕击防护性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2005(10): 1-6.

[16] 王云飞. 输电线路的选择性及其影响因素的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.

作者简介:

黄江龙(1987), 学士, 主要从事高压输电线路防雷应用与技术监督研究;

李倩竹(1989), 硕士, 主要从事输电线路在线监测及防雷措施分析。

(收稿日期: 2015-07-31)

(上接第11页)

配网 GIS 平台中,从而可以调用潮流计算程序计算出潮流结果。结合实例分析验证了模型的正确性。

不足之处是:利用网基矩阵方法从配电网的变结构特点出发,能有效地表示配电网拓扑;但它是基于矩阵的表示方法,而配电网的矩阵稀疏程度很高,占用了较大的存储空间,无法快速跟踪和识别网络故障。下一步将研究 GIS 系统数据存储的问题,在电力系统公共信息模型(CIM)的基础上建立配电网 GIS 模型,从而解决了数据存储空间不足的问题,进一步为配网自动化的改造工作提供参考依据。

参考文献

[1] 曹英丽,郑伟,周云成. 基于 GIS 平台的配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 125-127.

[2] 陈根永,陈永华. 基于 GIS 平台的配电网故障诊断算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 71-74.

[3] 刘青海,杨建华,杨普,等. 基于 GIS 组件的配电网规

划与改造软件[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 106-109.

[4] 周云成. 基于 GIS 的 10kV 配电网电气连通性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 83-87.

[5] 周云成,许童,朴再林. 基于 CIM 的配电网 GIS 数据模型存储与维护方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 104-108.

[6] 汤红卫,王华,郭喜庆. 一种基于地理信息系统的配电网规划方法[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 79-82.

作者简介:

张东明(1987), 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制;

常喜强(1976), 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术;

刁海勇(1973), 高级工程师, 研究方向为输变电检修技术;

王维庆(1959), 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统自动化和风力发电机组的智能控制;

任华(1985), 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2015-08-10)