

利用泄漏电流递归分析法研究绝缘子雾凇闪络

薛恒嵩

(南京供电公司,江苏 南京 210008)

摘 要:绝缘子的运行状态直接关系到输电线路的安全运行。由于泄漏电流贯穿于绝缘子运行始终,能够直接反映绝缘子表面状态及放电特征。在实验条件下模拟雾凇环境,以硅橡胶绝缘子为试样,将其悬挂于雾凇环境下不同时间,雾凇即在绝缘子表面凝结,然后分别施加电压至发生闪络。通过高速摄像机记录闪络现象和过程,采用递归分析法研究泄漏电流的非线性特征,将闪络发展过程中泄漏电流的内在变化在递归图及其定量指标中表征出来,结果表明泄漏电流的非线性特征变化与闪络过程中绝缘子表面放电现象具有很好的一致性,有效揭示了绝缘子雾凇闪络过程的发展以及闪络发生的机理,从而提高户外绝缘子运行的可靠性与准确性。

关键词:绝缘子;雾凇闪络;泄漏电流;递归特征;状态检测

中图分类号:TM855

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)06-0047-04

在电力系统输电线路中,绝缘子能够同时满足机械负荷与电气绝缘双重性能的要求。伴随着超高压、特高压输电工程的开展,绝缘子在得到日益广泛应用的同时,也成为影响电网安全稳定运行的重要因素^[1]。寒冷浓雾天气容易引发雾凇现象,绝缘子长时间在雾凇环境下运行时,表面将覆盖不同程度的雾凇层,加剧绝缘子表面电场分布的不均匀程度,进而导致局部放电的发生和泄漏电流的增大,最终降低绝缘子表面电气性能甚至引发闪络故障,给电力系统的安全运行造成威胁^[2,3]。因此,开展绝缘子雾凇闪络的检测研究,不仅有助于预防闪络事故的发生,提高绝缘子运行可靠性,而且能够加强对绝缘子的监管能力,减少维护费用,对保障电力系统安全运行具有重大意义^[4]。泄漏电流贯穿于绝缘子运行过程始终,能够在运行中连续、直观、综合地反映各种因素对绝缘子运行状态的影响^[5]。绝缘子表面的动态变化必然引起流过绝缘子表面的泄漏电流发生变化,通过检测泄漏电流可以随时反映绝缘子在各种因素影响下真实的运行状态。然而,由于影响绝缘子泄漏电流的因素很多,当前泄漏电流特征量的选取与研究结果存在较大的分散性,尚未形成统一的绝缘子运行状态预警系统,仍然需要进行大量的试验和分析,在总结当前研究方法的优点同时,进一步挖掘泄漏电流的内在变化机理,改善检测方法,从而能够及时反映绝缘子的绝缘性能,预防闪络事故的发生。

针对雾凇的形成条件,本文在实验室人工模拟试验系统下分别研究绝缘子在各种雾凇环境下的闪络现象与过程,并采集闪络过程中绝缘子表面的泄漏电流,在对比分析当前泄漏电流检测方法的基础上,将递归分析理论引入对泄漏电流的分析之中,得到泄漏电流时间序列的递归图及其定量指标,根据递归图拓

扑结构和纹理差异以及相应的递归定量指标表征了绝缘子运行状态与雾凇环境因素的关系,为绝缘子运行提供了一种可视化的检测方法。

1 试验系统与方法

绝缘子雾凇闪络试验装置如图 1 所示。试验以单片硅橡胶绝缘子为试样,采用无水乙醇清洗试样表面并置于干燥容器室温干燥 24 h,然后垂直悬挂于人工雾室中。采用循环冷凝系统将雾室温度控制为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,待试样温度与环境温度相一致时,采用超声波盐雾发生装置将 NaCl 盐溶液雾化并注入雾室,盐雾电导率为 $1.0\sim 5.0\text{ ms/cm}$,注入速率为 $2.1\text{ cm}^3/\text{min}$,雾室内的风速小于 1.0 m/s 。当雾室相对湿度达到 100%饱和时,将绝缘子在雾室中所设定的实验条件分别维持 3 h,5 h,9 h 和 15 h,然后分别施加 30 kV/ms 工频交流电压,采用高速摄像机记录绝缘子表面的雾凇积聚及闪络过程中表面放电现象。采用多功能数据采集卡(PCI-9111 DG/HR)采集闪络过程流过绝缘子表面的泄漏电流,采样率为 5.0 kHz 。

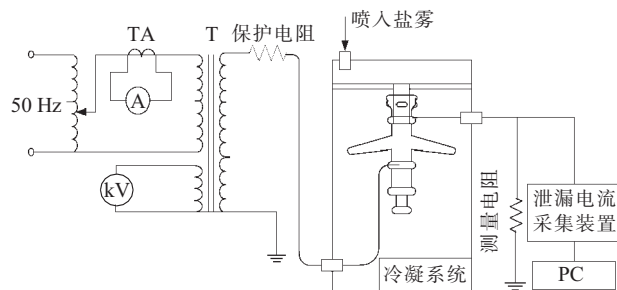


图 1 试验系统

2 试验结果与讨论

2.1 绝缘子表面雾凇状态

绝缘子表面雾凇形态如图 2,3 所示。盐雾中无数

0℃以下而尚未结冰的过冷雾滴在伞群表面不断积聚冻结形成雾凇沉积物和雾凇层。雾凇中雾滴与雾滴间的空气间隙很多,呈现典型的白色外表和粒状结构,其主要特征为:粒径很小,比重较轻,内聚力较差,结构蓬松,中间有大量气孔。

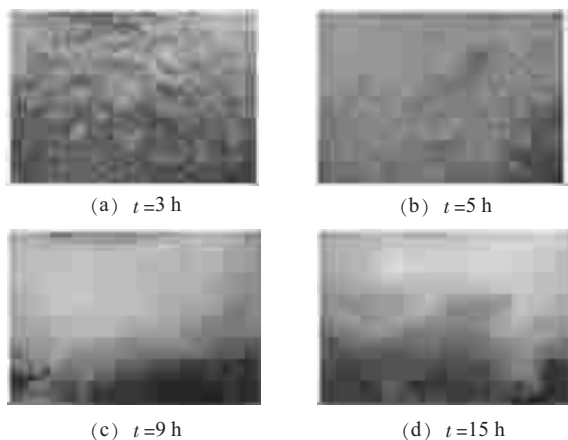


图2 绝缘子上表面雾凇状态

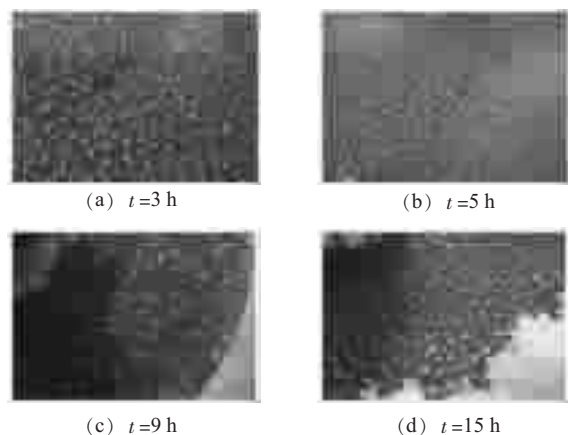


图3 绝缘子下表面雾凇状态

从图2,3中可知,由于伞群结构的不同,伞群上、下表面雾凇在形成过程、形态、覆盖量以及物理性质上存在较大的差别。随着盐雾的注入,伞群上表面从靠近护套部位开始逐渐形成微霜,雾滴不断冻结沉积,局部出现粒状雾凇并且逐渐增加,随着注入时间的增加,伞群上表面被雾凇包裹,雾凇变得松散柔软,厚度不断增大。伞群下表面开始形成离散的微小冰花,伴随雾滴的粘附,微小冰花的分布密度不断增大,当盐雾注入时间继续增加时,附着的冰花不断增大但仍为离散状态。所用NaCl溶液浓度越高,相同时间内在绝缘子表面形成的雾凇层越薄,但雾凇结构更加紧密。

2.2 雾凇闪络现象与过程

雾凇环境下绝缘子的闪络放电现象与过程如图4所示。将开始施加电压的时刻记为0时刻,则雾凇闪络可分为以下6个阶段。

(1) 阶段I:雾凇在交变电场作用下融化,润湿绝缘子表面并形成导电层。由于雾凇粒径小且结构蓬松,

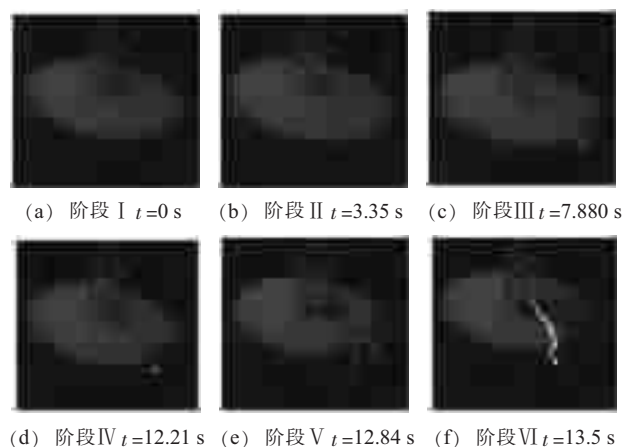


图4 绝缘子表面污闪放电过程

在外加交流电压作用下,带电粒子发生振动而产生热效应,导致绝缘子表面的雾凇融化并形成导电层,引发泄漏电流流过绝缘子表面。随着润湿程度和外加电压的增加,泄漏电流逐渐增大。在绝缘子表面完全湿润后,在泄漏电流产生的焦耳热作用下,雾凇的融化速度加快,进一步降低表面电阻,增大泄漏电流。

(2) 阶段II:随着电压的升高和表面泄漏电流的增大,在绝缘子伞群边缘部位开始出现微弱的电晕放电点,并伴随有间断可闻的放电声音。从图3中可知绝缘子结构导致表面雾凇分布状况存在差异,因此泄漏电流形成的路径和电流密度不同,使得绝缘子表面受到的泄漏电流热效应也存在差异。在绝缘子表面边缘,雾凇层较薄,导电层蒸发速度较快,容易形成干燥区,进而改变绝缘子表面的电场分布,同时边缘地带表面曲率半径较小,局部电场强度较大,容易最先形成微弱的电晕放电。

(3) 阶段III:电晕放电不断发展。由于电极附近电流密度较大,泄漏电流流过产生较多的焦耳热,导电层蒸发速度较快,在电极部位曲率半径较小的地带也出现多处可见放电点,且亮度较前一阶段增强,放电声音持续可闻。

(4) 阶段IV:随着绝缘子伞群表面干燥区的形成和外加电压的增加,当局部电场强度达到空气的击穿场强时,干燥区就会产生局部放电和电弧。绝缘子表面电弧瞬间产生的位置是随机的。绝缘子表面导电层及形成的干燥带可以近似等效为电阻串联组成,由于表面雾凇分布的不均匀以及不断融化同时不断的蒸发现象的发生,干燥带的形成位置不断变化,因此绝缘子表面电弧瞬间产生的位置存在随机性。

(5) 阶段V:局部电弧产生后,由于电弧的下降型伏安特性且电阻较干燥区小,使绝缘子表面总电阻显著降低,泄漏电流出现突然增加现象,局部电弧的出现使绝缘子表面的电位重新分布,当其他干燥区的电场强度足以使空气发生碰撞电离时,产生新的局部电弧,

即局部电弧可能多处同时产生。随着外加电压的进一步增加,由于绝缘子表面污层电解质的正温度系数影响和局部电弧的下降型伏安特性,泄漏电流将增大,使得提供给电流的能量增加,电弧温度升高,有利于电离过程的发展,最终导致局部电弧伸长。

(6) 阶段Ⅵ:局部电弧向前延伸至另一处局部电弧时,将汇集在一起形成更长的局部电弧并继续延伸,当局部电弧长度发展至总放电路径长度的 60%~80%时,局部电弧将快速向前发展至绝缘子闪络。

绝缘子下表面各处局部电弧向前伸长过程中最初都是贴着绝缘子下表面向前延伸,但当局部电弧延伸至绝缘子边缘时,局部电弧的发展出现两种情况:一是沿着绝缘子上表面继续向前延伸,另一种则是逐渐飘离绝缘子表面形成空气间隙电弧向上发展。局部电弧漂移成空气间隙电弧向上延伸并发生串接时,被短接的绝缘子片爬电距离内的所产生的所有局部电弧都将瞬间熄灭。这主要是由于绝缘子爬电距离被短接瞬间,被短接部位的电场强度急剧减小,无法维持局部电弧的燃烧。

2.3 雾凇闪络过程泄漏电流时频分析

泄漏电流作为沿面放电和绝缘子绝缘性能的集中体现,涵盖了丰富的有关污闪形成全过程的状态信息。在表面绝缘较好或雾凇形成的导电层完全湿润绝缘子表面时,无电弧放电存在,电流为表面阻性污层电流,幅值很小;当表面绝缘性能下降,有电弧产生,在一个周波内,既有其值较小的污层电流,又有其值较大的电弧电流;当电弧放电不断增强,周波内无熄弧或者零休存在,电弧持续燃烧,电流变成电弧电流,发生闪络。雾凇闪络发展 6 个阶段的泄漏电流波形及其频谱特征如图 5—10 所示。

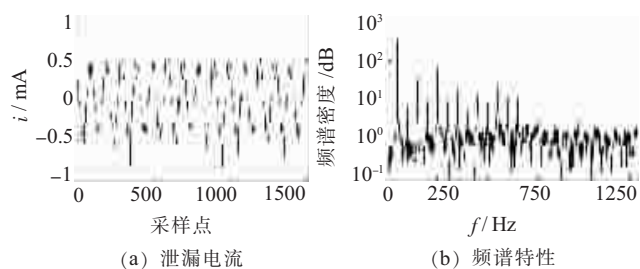


图 5 阶段 I

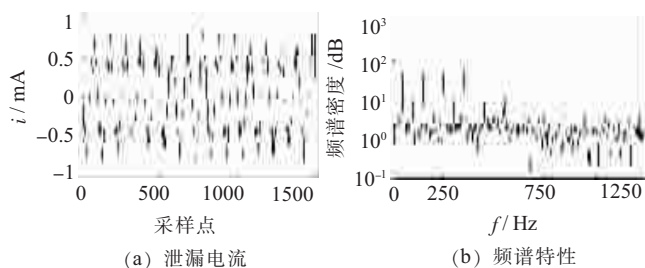


图 6 阶段 II

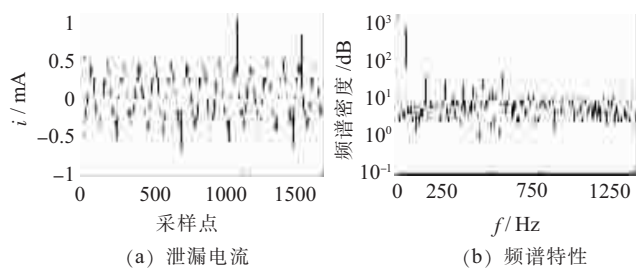


图 7 阶段 III

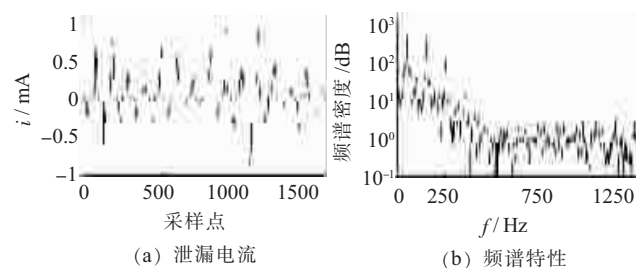


图 8 阶段 IV

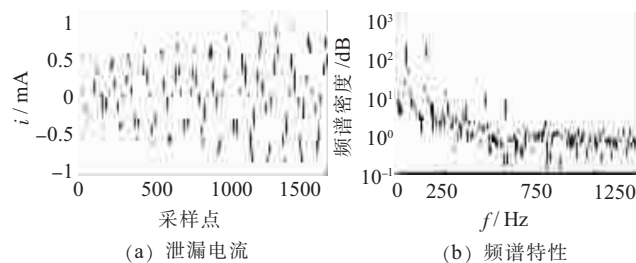


图 9 阶段 V

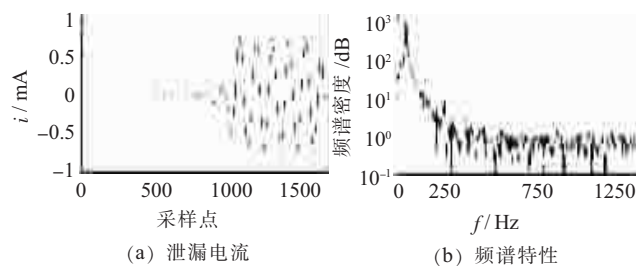


图 10 阶段 VI

(1) 阶段 I:泄漏电流主要为阻性电流,波形呈现为发生了一定畸变的正弦波,峰值在 0.5 mA 左右。此时绝缘子表面层雾凇卡是融化,表面形成导电通道,但没有干燥带放电发生。

(2) 阶段 II:电流波形为近似三角的锯齿波,电流信号峰值达到 1 mA。此时绝缘子表面完全湿润,形成良好的导电通道,实验中可以听到微弱的放电声音,表明有微弱的放电发生。

(3) 阶段 III:此时在第二阶段电流信号的顶端开始出现叠加脉冲,脉冲峰值可以达到 3 mA。在绝缘子片上表面可以看到一些点放电现象发生(电晕放电),并伴随有持续的放电声音。此时的峰值叠加尖端脉冲即为电晕放电信号。

(4) 阶段 IV:泄漏电流开始出现近 50 mA 的脉冲峰值,此时的电流基波也呈现尖端脉冲的形状。实验中

可以观察到,在这个阶段绝缘子表面开始出现干燥带放电现象,放电位置不断移动变化但始终不曾间断,其中不时出现较为强烈的电弧放电。

(5) 阶段 V: 此时为闪络前的放电阶段。在绝缘子上、下表面均可以观察到多处强烈的电弧放电,且放电强度不断发展,电弧不断连接拉长。此时泄漏电流峰值急剧增大,达到 100 mA 以上。由于此阶段放电相对稳定,没有出现峰值突出的脉冲。

(6) 阶段 VI: 闪络阶段。局部电弧逐渐连接伸长,最终跨接两电极,绝缘子表面发生闪络。

在污闪实验中,泄漏电流随时间总体上呈现不断增加的趋势,在起始阶段,电流值平稳,少有冲击起伏,在电弧产生发展阶段,电流冲击起伏越来越明显,到临闪阶段,出现非常大的放电脉冲。每次的放电脉冲过后,都会出现短期的小电流,这是因为放电脉冲导致了绝缘子表面变干燥,而后污层受湿和干带形成需要时间,在此期间绝缘性能恢复,泄漏电流比较小且平稳。

2.4 泄漏电流递归分析表征雾凇闪络

(1) 递归图定性检测绝缘子雾凇闪络。由于泄漏电流时间序列中包含大量工频信号,对进行非线性分析产生负面的影响。由于放电电流频带一般高于工频,因此可以采用小波变换多分层理论对电流信号进行分解,滤去工频分量。采用时间序列相空间重构方法对重构后的泄漏电流时间序列进行递归分析,得出雾凇闪络过程中递归图的变化。在雾凇闪络起始的前 3 个阶段,大多数递归点均匀、平行于主对角线分布,只有少量递归点以杂散的形式存在,表明泄漏电流具备较强的周期性变化,绝缘子表面放电主要是随机性的放电,而没有发生剧烈变化,并且放电之间的相关性较差。而在后期递归图拓扑结构发生显著的变化,出现多个类似“十字”的空白地带,递归点在各个空白地带之间进行密集分布,递归点分块的交替变化有效表征了绝缘子表面放电发生的阶段性突变,反映了电弧放电通道的形成、熄灭与再次形成的过程,正是由于表面放电的这种交替变化才能最终在某一个放电通道形成贯穿金具两端的闪络电弧。

(2) 泄漏电流递归定量指标。雾凇闪络发展各个阶段的递归定量指标如图 11 所示。随着闪络各个阶段的发展,递归率(RR)和确定性(DET)均呈现下降的趋势。该变化特征表明随着绝缘子表面放电的发展,泄漏电流中具有规律性的组分逐渐减少,不确定性组分逐渐增加,表面放电从起始的随机发生的微小火花放电经过弱的电弧放电,最终形成稳定、强烈的放电通道。

3 结束语

针对雾凇环境引发的绝缘子闪络事故,基于雾凇

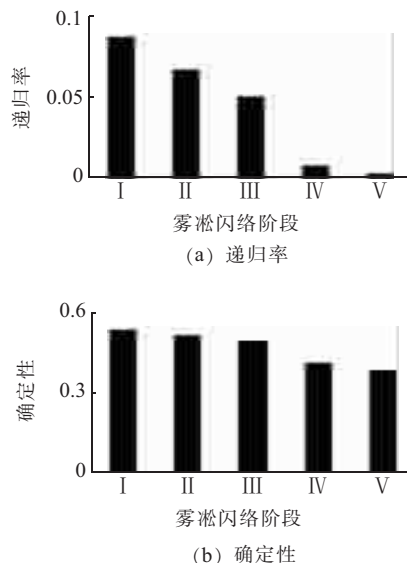


图 11 雾凇闪络发展各个阶段泄漏电流的递归定量指标

闪络现象的观察采用递归分析方法分析泄漏电流的非线性特征,监测并揭示了绝缘子在雾凇环境下的闪络过程与机理,结果表明:电导率较高的雾凇覆层容易引发绝缘子表面发生闪络;在雾凇覆盖绝缘子表面初期较易引发绝缘子闪络;泄漏电流的递归图变化定性表征了绝缘子雾凇闪络发展各个阶段的表面放电特征,并且递归定量分析进一步增强了对闪络过程的监测以及对闪络机理的理解。

参考文献:

- [1] DU B X and LIU Y. Pattern Analysis of Discharge Characteristics for Hydrophobicity Evaluation of Polymer Insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 114-121.
- [2] 蒋兴良,舒立春,孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 20-24.
- [3] 谢述教,蒋兴良,王 强,等. 覆冰绝缘子直流闪络特性研究现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 16-18.
- [4] GUBANSKI S M, DERNFALA K, ANDERSSON J, et al. Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14 (5): 1065-1080.
- [5] DOUAR M A, MEKHALDI A, and BOUZIDI M C. Flashover Process and Frequency Analysis of the Leakage Current on Insulator Model Under Non-uniform Pollution Conditions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1284-1297.
- [6] 张佰庆,崔艳东,童维占. 防污闪 RTV 硅橡胶喷涂施工的工艺及要点[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 58-60.

作者简介:

薛恒嵩 (1981),男,江苏扬州人,工程师,从事电力系统管理工作。

表 1 智能二次设备光口连接关系表

| 装置 1 | 端口 1 | 装置 2 | 端口 2 | 装置 3 | 端口 3 | 光纤芯号 | 接收数据集用途 |
|------------|-------|----------------------|------------------|-----------------|-------|------|---|
| XX 线 ## 保护 | #3_R1 | 过程层 GOOSE 交换机 A | P1_T | — | — | 1 | 母线保护动作闭重、远跳 |
| | #3_T1 | | P1_R | | — | 2 | — |
| XX 线 ## 保护 | #3_R3 | 光配架 1-A (光配架 2-B) | 1-A-1 (2-B-1) | XX 线 ## 智能终端 | #2_T2 | 尾纤 | 开关位置 压力低闭锁重合闸 另一套智能终端闭重 本套智能终端闭重放电 |
| | #3_T3 | | 1-A-2 (2-B-2) | | #2_R2 | 尾纤 | — |

高级功能应用水平。

(3) 总结已有智能变电站设计、调试、运行维护经验,开展相应分析,进一步规范江苏电网智能变电站典型设计和调试方法,形成标准化作业流程。

(4) 进一步修订完善智能变电站技术标准体系。加快编制和修订智能变电站领域技术标准,推动重点技术标准的国际化,构建江苏电网适应新一代智能变电站建设需求的标准体系。

参考文献:

[1] 国家电网公司基建部. 智能变电站建设技术[M]. 北京:中国电力出版社,2012:132-151.
[2] 王 勇,梅生伟,何光宇. 变电站一次设备数字化特征实现[J].

电力系统自动化,2010,34(13):93-98.

[3] Q/GDW 494—2009,330~750 kV 智能变电站设计规范[S].
[4] Q/GDW 441—2010,智能变电站继电保护技术规范[S].
[5] 冯 军. 智能变电站原理及测试技术[M]. 北京:中国电力出版社,2011:57-59.
[6] 吴 罡,李 琳,李 翔,等. 110 kV 智能变电站设计方案初探[J]. 江苏电机工程,2011,30(2):31-35.

作者简介:

吴 威(1975),男,江苏海门人,工程师,从事电网建设管理及的研究工作;
宋亮亮(1985),男,江苏启东人,工程师,从事电力系统继电保护及智能变电站相关技术的研究工作。

Review on 500 kV Substation Construction Technology in Jiangsu Power Grid

WU Wei¹, SONG Liangliang²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;
2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the continuing evolve of smart substation technology, as well as the increasing complexity of construction scheme, the long-term operating performance of smart substation has proposed requirements to construction mode. This paper introduces new technical application of secondary system in the 500 kV TIAN-Muhu substation based on the State Grid's existing typical building program. On the premise to meet operational reliability, it proposes to promote a further combination of secondary equipment and to increase information fusion level of smart substation, which will achieve the secondary device function optimization.

Key words: Smart Substation, Construction Technology, Unification of Relay and Control

(上接第 50 页)

Research on Insulator Rime Flashover Through Leakage Current Regression Analysis

XUE Hengsong

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: The state of insulator is critical to secure operation of transmission and distribution lines. The leakage current is a reflection of the surface state and discharge character of insulator because it exists all the time. Under laboratory environment, the rime is mimicked by human. Silicone rubber insulators are placed into the mimicked rime with various times to damage their insulation in different extent, and then voltage is applied to them to trigger flashover. Through using high speed video camera to record the phenomenon and process of flashover, the nonlinear character of leakage current can be studied by regression analysis which provides recurrence plot and quantitative index to characterize leakage current's internal variation. The result shows that the nonlinear character of leakage current is consistent with insulator's surface discharge phenomenon. The research reveals occurrence mechanism and developing process of insulator's flashover under rime environment, which helps to ensure the reliability of outdoor insulators.

Key words: insulator; rime flashover; leakage current; regression character; state detection