

Analysis of Phase to Phase Electric Field Distribution and Barrier Discharge in 35 kV Switchgear

Ying Yu, Zhe Qu

State Grid Hubei Corporation Maintenance Company, Wuhan Hubei
Email: 12775549@qq.com

Received: Dec. 10th, 2015; accepted: Dec. 28th, 2015; published: Dec. 31st, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In 35 KV switchgear, the discharge phenomenon of interphase insulating barrier has occurred many times, and it led to a severe interphase flashover when severely. Through the analysis, it is found that these discharges switchgear have run for a certain period of time. In this paper, the interphase electric field and the condition of discharge are analyzed, and the basis and necessary condition of the barrier's discharge are analyzed, too. The relationship between the position of the barrier and electric field distribution is analyzed, and many measures are proposed to prevent the barrier's discharge. According to the comparison, setting a barrier made by silicone rubber near the phase line is best.

Keywords

35 KV Switchgear, Interphase Barrier, Electric Field Distribution, Contaminant Flashover

35 kV开关柜的相间电场分布与屏障放电分析

喻莹, 瞿哲

国网湖北省电力公司检修公司, 湖北 武汉
Email: 12775549@qq.com

收稿日期: 2015年12月10日; 录用日期: 2015年12月28日; 发布日期: 2015年12月31日

摘要

35 kV开关柜内的相间绝缘屏障上的放电现象已出现过多起,严重的已导致发生相间闪络。通过分析发现这些出现放电现象的开关柜都已运行一定的时间。本文结合相间电场的分析和产生放电的条件,逐一剖析了屏障放电的基础条件和必要条件,并对相间设置的屏障位置对电场分布的影响做了分析,提出了消减屏障上放电的多种措施,优选在相线附近设置硅橡胶材质制作的屏障的方法。

关键词

35 kV开关柜, 相间屏障, 电场分布, 污秽放电

1. 概述

2015年7月,光谷变的站用电源35 kV开关柜内发生了间断性的放电,其放电声不大,声音较清脆,放电时间间隔属秒级,能清晰地分辨出每次的放电。通过停电检查,各处未发现明显的放电痕迹。使用放大镜观测相间屏障的边缘,此时可以看到沿电场方向的线状黑色物,位置位于两相触头连线上的屏障边缘。显然这应该是由放电所引起的。

该种放电现象在有的变电站中亦早已发生过,如天津某站的35 kV开关柜因为相间屏障放电强烈而至该柜退出运行,如图1所示。在相间最近点处的屏障上,有一条明显的放电痕迹,距边缘约10 cm处有一团黑点,垂直向上的黑线逐渐变细。显然在放电过程中有空间电荷撞击黑点处,并向上爬升而完成一次放电。

这种放电现象的放电能量一般不大,它主要是由屏障上积聚的空间电荷在一定的环境条件下所形成的,在某个时间段内出现不连续的、稳定的啪啪放电声。

开关柜内的放电成因分析与防止措施已有不少的研究成果。国网丽水供电公司[1]从KYN61-40.5系列开关柜中电流互感器对SMC绝缘隔板放电的研究中发现,绝缘隔板与电流互感器距离过近,开关柜内湿度过大是造成放电的两个主要原因。华能海南发电[2]的主变35 kV侧,从两相短路发展成三相短路的事事故分析指出,相间绝缘隔板的爬电距离未达到电力规程要求,由于导体与绝缘板间距小,导致场强相对集中,长期局放造成了绝缘板性能下降,最终发生闪络。

开关柜内相间有屏障时的电场分布及场强值计算还未见报道。虽然造成屏障放电或最终形成相间闪络事故的原因是多方面的,但显然与相间电场发生了畸变有关。从理论上讲,上述的放电现象与相间的电场分布有密切关系。相间屏障可以机械地阻隔空间电荷的运动,并利用这些空间电荷来改善整个的电场分布。但这些空间电荷在屏障上形成放电后,有可能改变了相间的合成电场分布,使相线发出的电荷数剧增,导致相线的热塑包层上也出现了明显的过热痕迹。严重情况下出现相间短路也是完全可能的。研究相间的电场分布是防止发生相间放电或闪络的重要途径。

2. 相间无屏障时的场强分布

相间无屏障时,矩形母排的倒角处曲率最大,可见应是该处的场强最高,而两相间的中间点场强最低。为计算两相间的场强最高值和平均值,进而推算出该电场的均匀系数,可以用简化模型计算。因矩形母排靠近另一相线的倒角处的倒角 $R = 5 \text{ mm}$,两相间的场强分布可由半径为 $r = 5 \text{ mm}$ 的平行圆柱体构成,该电场最大场强值可按公式(1)计算如下[3]



Figure 1. The distribution of bus and insulating barrier in 35 kV switchgear

图 1. 35 kV 开关柜中母排与绝缘屏障的布置

$$E_M = \frac{U}{r + \frac{d}{2}} \cdot \frac{9}{10} \text{ kV/cm} \quad (1)$$

$$2r \ln \frac{2}{r}$$

其中 d 为两相间的空气间隙。对于 35 kV 开关柜而言, 作用电压为两相间的线电压 $U = 35 \text{ kV}$, 当两相母排间距为 $d = 270 \text{ mm}$ 时, 上式可得计算结果为

$$E_M = 9.45 \text{ kV/cm}$$

导线计算半径 r 减小后, 其最大场强值增加较快。可以算出当 $r = 3 \text{ mm}$ 时

$$E_{M3} = 13.7 \text{ kV/cm}$$

$R = 5 \text{ mm}$ 时的两相间平均电场强度

$$E_{cp} = \frac{35/2}{27/2} = 1.296 \text{ kV/cm} \quad (2)$$

据此该电场的均匀系数

$$f = \frac{E_M}{E_{cp}} = \frac{9.45}{1.296} = 7.29 \quad (3)$$

可见该电场属于典型的极不均匀电场类型, 根据已有的气体放电试验数据表明, 在作用电压的某个时刻, 两相电极的电场最强处已可出现电晕放电现象, 这些放电产生的电荷在电场力的作用下到达屏障附近时, 受屏障阻挡而逐渐堆积在屏障的两侧。空间电荷的存在将使得屏障处的电场分布发生变化, 两相间的电场将是由电源建立的电场和空间电荷共同作用的结果。

3. 相间有屏障时的场强分布

尖-板空气间隙的电场设置屏障后, 其屏障所处位置不同, 电场分布也不同[4]。在不均匀电场中, 靠近电极处的屏障作用比远离电极处的屏障作用更大些, 这是因为电离尚未充分发展即被阻止的缘故, 如图 2 所示[5]。

在直流电压作用下, 对于正尖负板来说, 放置屏障后的气隙击穿电压均高于无屏障时; , 且靠近正尖时的击穿电压最高; 而负尖正板时, 靠近高场强区时, 击穿电压升高, 靠近低场强区时, 却明显降低。这是因为设置屏障后, 负尖高场强区产生的大量负离子积聚于屏障上, 加强了与正板间的电场, 降低了气隙的击穿电压。

工频电压作用下的尖-板空气间隙击穿电压和屏障位置的关系如图 3 所示[5]。工频电压下极不均匀电场中, 同样能形成大量空间电荷, 故屏障同样具有积聚空间电荷、改善电场的作用。在没有屏障时, 尖-板间隙中工频电压下击穿是在尖电极具有正极性的半周内发生的。但有了屏障后的气隙击穿电压总体上是大于无屏障的。虽然屏障在低场强区的气隙击穿电压远低于高场强区, 与直流电压作用下的气隙击穿电压相比较, 可以发现工频电压作用时, 强场区一侧的气隙击穿电压类同于正尖负板的情景, 而弱场区一侧类同于负尖正板的情景, 使总体上的击穿电压均高于正尖负板值。

气隙中设置屏障后, 利用 ANSYS 电场分析软件, 可以得到屏障在不同位置时的两电极之间的最大电场分布。电场结构以图 1 为例, 设 35 kV 开关柜母排尺寸 $80 \times 10 \text{ mm}^2$, 母排边缘倒角 $R = 5 \text{ mm}$, 相间(两相间最短空气间隙)间距 $d = 270 \text{ mm}$, 绝缘屏障厚度 $h = 5 \text{ mm}$ 。母排的电场分布是一个无界域内的不对称三维场,

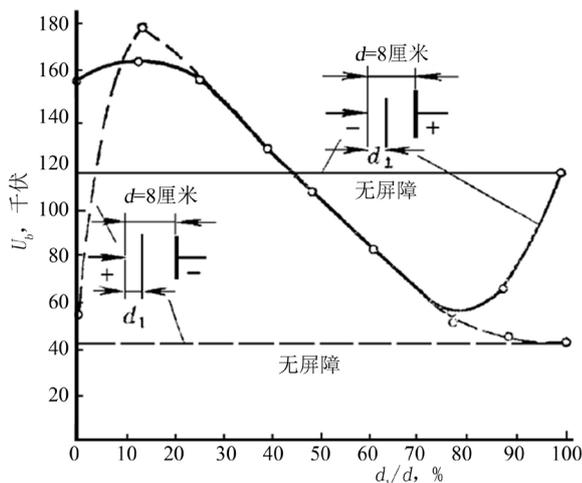


Figure 2. The relationship between breakdown voltage of rod-plate air gaps and the position of the barrier under DC voltage

图 2. 直流电压下尖-板空气间隙的击穿电压和屏障位置的关系

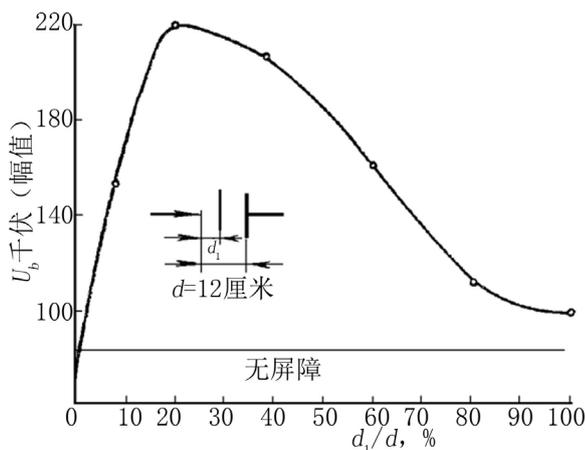


Figure 3. The relationship between breakdown voltage of rod-plate air gaps and the position of the barrier under power-frequency voltage

图 3. 工频电压下尖-板空气间隙的击穿电压和屏障位置的关系

电极的几何形状比较复杂, 因此需要采用适当简化方法, 才能使有限元计算顺利进行。简化条件如下:

(1) 将三相模型简化为两相模型。由于 AB 与 BC 两相在结构上是对称的, 两相之间的电场强度分布的规律是一致的, 因此仿真计算只建立两相母排模型。

(2) 以有限边界代替无限边界。将实际情况中无穷远处的边界移到距离母排适当处, 母排对比于整体模型的尺寸来说很小, 因此仿真计算结果的误差也会较小。

(3) 建立母排拐角处的局部模型。由于母排拐角处半径最小, 并根据实际运行经验可知, 拐角处的电场强度最大, 故可建立母排拐角处的局部模型, 以着重研究拐角处的最大电场强度, 并减少运算量。

在 ANSYS 中建立两相母排的三维模型, 采用自由网格划分对仿真模型进行剖分。根据对仿真模型各部件结构的精细程度, 对母排拐角处以及附近空气部分需较密剖分, 而空气部分则可选取大的网格尺寸进行剖分, 如图 4 所示。根据实际运行条件, 对 A、B 相母排的电压分别施加为运行相电压最大值 $28.57\angle 0^\circ$ kV、 $28.57\angle -120^\circ$ kV, 频率为 50 Hz。

以 A 相母排右上角为第 1 个测量点, 向右每间隔 10 mm 设一个测量点, 第 20 个测量点为 B 相左上角, 电场强度分布如图 5 所示, 其中红线为屏障处于 AB 相中间时的电场分布。因为屏障阻隔电荷的作

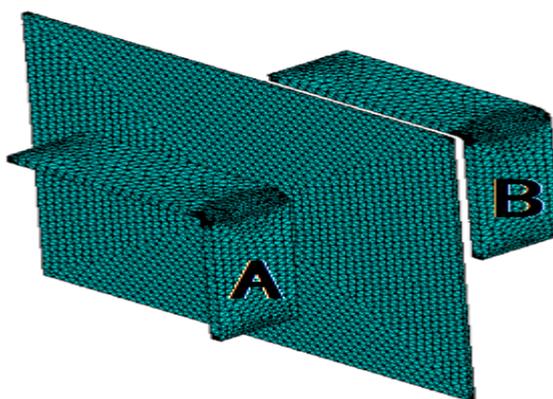


Figure 4. Subdivision in two-phase bus and insulating barrier

图 4. 两相母排和屏障的剖分

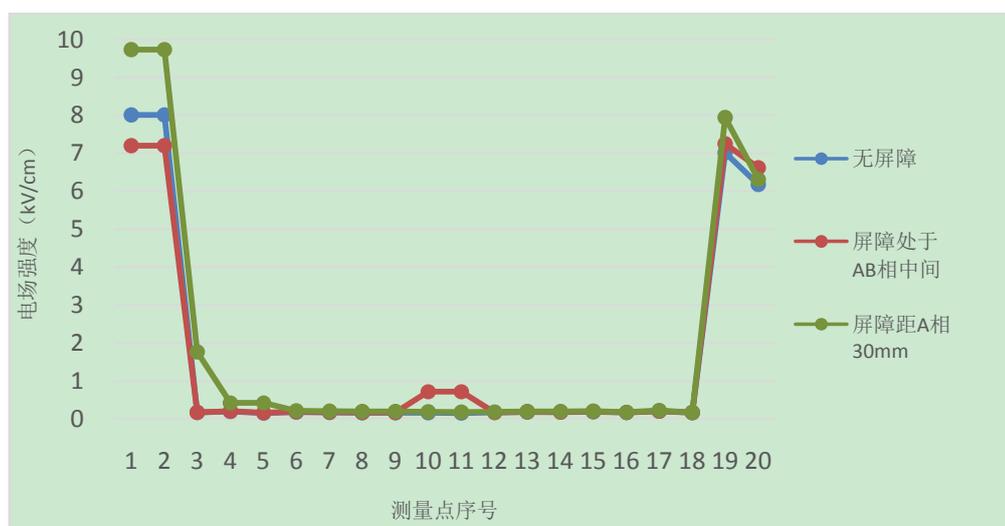


Figure 5. The largest electric field distribution with the different position of the barrier

图 5. 屏障位置不同时的最大电场分布

用, 该处的场强值稍高。绿线为屏障距 A 相 30 mm 时的电场分布。屏障的作用使其附近的场强有所提高, 并因为距 A 相较近, 感应电荷使 A 相处的场强比无屏障时明显增加。

无屏障时计算得到的 A 相表面最大场强与式(1)所得值相近, 屏障在中间位置时的场强分布反映的整体电场仍然是极不均匀的, 在屏障处, 由于屏障阻隔和积聚的正负空间电荷产生的电场方向与电源产生的电场方向一致, 使该处的场强值有所提升, 但该区域仍属于较低的场强。可见在工频电压作用下对电荷的阻隔和改善电场分布的效应并不明显。另外也可以看出, 正常情况下屏障上积聚的电荷数并没有明显地增加。

当屏障靠近 A 相电极附近时, A 相表面附近的场强值都有所抬高, 表现出屏障对电荷的阻隔作用还是很明显的。如果工频电压升高(工频过电压时), A 相附近的高场强区将向气隙中部推进, 屏障上的电荷数也会急剧增加, 突显出屏障对改善电场分布的作用, 从而使得屏障在电极附近设置时, 可以得到气隙的最大放电电压。所以, 在高场强区的电极附近设置屏障要比远离电极对于提高放电电压要好得多。而当两电极处均有可能发生气体放电时, 显然在靠近电极处均应设置屏障, 以利改善电场分布, 提高气隙的放电电压。

相间设置绝缘屏障后, 如果屏障表面干净清洁, 聚集在屏障两侧的电荷是无法沿垂直于电场方向运动的。即使大气环境湿度极高, 但由于屏障表面吸附水分的能力有限, 即空气中的绝缘屏障本身并无温差效应的存在, 故屏障表面无法形成连续的水膜, 所以在高湿度的影响下也无法使电荷向屏障边缘运动。

但是, 开关柜经过长时间的运行后, 屏障表面开始出现污秽物的积聚, 此后的一系列过程如污秽物的沉积、适当的高湿度大气环境时的污秽物湿润, 接着屏障表面低电阻通道的形成, 最终出现屏障上的放电现象[6] [7]。整个过程类似于污秽绝缘子的污闪, 而其中干带形成的先决条件在此处是不需要的。

从上述分析结果可以看出, 绝缘屏障上放电形成的基础条件是要在相间低场强区设置的屏障, 放电的必要条件是屏障表面出现了连续覆盖的污秽物, 且只要出现了高湿度的大气环境, 这种放电形式就是不可避免的了。

4. 可以采取的改进措施

当两相间无屏障时, 在工频过电压作用下的相间预放电所需的作用电压主要受两个因素的影响: 一是相间作用电压值应足够大; 二是电场中的最低场强值应不低于极不均匀电场中的起始放电场强值。考虑 35 kV 系统在 3 倍的工频过电压作用下时, 其值为

$$U_3 = 3 \times \frac{35 \times 1.1}{\sqrt{3}} = 66.7 \text{ kV} \quad (4)$$

将(4)式代入(1)和(2)式计算后, 由于平均场强低于极不均匀电场中的起始放电场强值, 可见在 3 倍的工频过电压作用下, 无屏障时是安全的。但鉴于中性点非直接接地系统的工频过电压可能会更高, 所以在无屏障时, 应适当增加两相间的间距。

在现有屏障结构情况下, 适当增加屏障的高度, 以增加泄漏距离也可以达到消减放电的作用。屏障上聚集电荷后, 尽管屏障表面的污秽受潮了, 但由于泄漏距离增长, 等值表面绝缘电阻也相应增大, 产生放电所需的场强要求更高, 即屏障表面的电荷数更多才行。在工频过电压不太高的时候, 这种措施还是有用的。

为了解决屏障污秽后表面受潮引起的放电现象, 在绝缘屏障表面涂覆 PRTV 涂料也不失为一种好方法[8]。PRTV 涂料在悬式绝缘子上使用的情况表明, 由于它所具有的憎水性, 使得绝缘表面污秽中不会具有连续性水膜, 从而使绝缘表面电阻不会出现显著的下降, 以此控制了泄漏电流值的增长, 达到限制电荷运动的目的。更有甚者, 将常用的环氧树脂材料制作的绝缘屏障换成硅橡胶材料[9], 其效果更好。

在众多改进措施中, 改变绝缘屏障的位置来消除这种放电现象是更理想的一种方法。根据上述的试验结果曲线和电场分析结论可以看出, 当屏障设置在两相电极附近的高场强区时, 屏障的阻隔电荷运动和改善电场分布的作用更明显。尽管会使得高场强区的场强值略有升高, 但因为气隙对于此处设置屏障而言, 其放电电压总是最高的。特别是配合采用硅橡胶材质的屏障, 效果最好。

5. 结论

通过以上分析可看出, 35 kV 开关柜中, 相间设置屏障后, 改变了两相间的电场分布。而出现的放电现象是由于污秽后的屏障上积聚有正负电荷, 当大气环境条件的空气湿度较大时, 浸润污秽层, 使屏障表面的绝缘电阻值急速下降, 造成屏障上积聚电荷的运动而出现的放电现象。

(1) 对于 35 kV 开关柜而言, 当两相间的间距在 270 mm 时, 在更高的工频过电压作用下, 最大电场强度处已发生明显的电晕放电, 对安全运行是不利的。采用绝缘屏障后, 有助于提高气体间隙的放电电压;

(2) 屏障位置的选择对于提高气体间隙的放电电压有着十分重要的作用, 在高场强区设置屏障可以有效地发挥阻隔电荷运动, 改善电场分布的作用。

(3) 采用涂覆 PRTV 材料的绝缘屏障, 或选用硅橡胶材质作为屏障, 充分利用其良好的憎水性质, 可以有效地消减受污秽屏障表面的放电现象。

参考文献 (References)

- [1] 王俊杰, 王平, 王红军. 35 kV 开关柜的防放电措施及其效果[J]. 浙江电力, 2014, 33(12): 73-75.
- [2] 陈海平. 一起典型 35 kV 开关柜复合绝缘击穿事故分析及整改措施[J]. 四川电力技术, 2013, 36(6): 81-83.
- [3] 解广润. 高压静电场[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 85-88
- [4] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 60-61.
- [5] 清华大学, 西安交通大学. 高电压绝缘[M]. 北京: 电力工业出版社, 1980: 117-118.
- [6] 梅忠恕. 多种污染因素对尖-板空气间隙放电电压的影响[J]. 高电压技术, 1990(1): 37-42.
- [7] 关志成, 赖庆波. 用局部表面电导率法研究绝缘子的积污规律[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(1): 10-12.
- [8] 程登峰, 蒋兴良, 王刘芳. PRTV 涂料在直流线路防覆冰闪络的应用效果[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 154-156.
- [9] 孙曼灵. 环氧树脂应用原理与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.