

500 kV 串联补偿装置自触发及主间隙放电分散性研究

林敏¹, 李杰²

(1.江苏省电力公司,江苏南京 210024;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103)

摘要:500 kV 串联补偿装置火花间隙因干扰因素影响在低于整定值时会发生自触发,引起串补旁路。文中采用 ANSYS 软件建立了串联补偿装置主间隙三维空间模型,计算分析了不同间距下主间隙空间电场及场强分布,搭建了主间隙工频放电特性模拟试验平台,开展了主间隙的放电分散性试验。仿真结果表明主间隙电场为稍不均匀电场,不均匀度很小。试验结果表明主间隙间距在[55 mm,70 mm]之间放电分散性较小,放电间隙的放电电压平均值与整定值相当,且远大于历次自触发的放电电压最大值,放电分散性自击穿的可能性较小。

关键词:串联补偿;主间隙;稍不均匀电场;放电分散性;自触发

中图分类号:TM863

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)06-0020-03

超高压远距离输电工程中采用串联电容补偿技术可有效补偿输电线路电抗,缩短线路等值电气距离,提高系统输送容量,增强系统的稳定性,同时对输电线路的潮流分布具有一定的调节作用^[1]。500 kV 输电线路固定式串联补偿装置投运后,受环境温度湿度、电磁干扰等多种因素影响,火花间隙在低于自点火电压定值下易产生自触发,造成串补旁路退出,甚至联跳线路,严重影响电网稳定运行,国内多台固定式串联补偿装置发生过此类故障^[2-7]。

国内外研究学者通过对串联补偿装置的检测与分析,认为受现场温度、气压、湿度等因素影响,火花间隙击穿电压存在一定的分散性,间隙间距整定较难控制,易在无触发情况下发生击穿^[6-8]。

1 串联补偿装置结构及间隙动作情况

某 500 kV 固定式串联补偿装置结构如图 1 所示,参数如表 1、表 2 所示。串联补偿装置由串联电容器、金属氧化物限压器(MOV)、放电间隙、旁路断路器、阻尼元件、触发装置及控保系统组成。其中金属氧化物限制器为电容器主保护,放电间隙为 MOV 和电容器后备保护,旁路断路器用于投入和退出串联电容器,阻尼元件用于限制电容器放电电流。

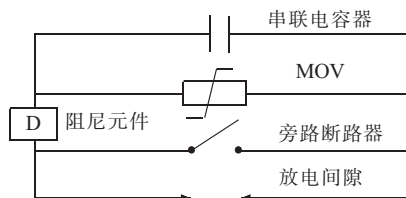


图 1 串联补偿装置结构示意图

据统计,该串联补偿装置 5 年内放电间隙发生了 14 次自触发行为,放电电压最小值为 148 kV,最大值为 218 kV,远远小于间隙放电电压设定值 321 kV,如

表 1 串联补偿装置电容器参数

电容值 / uF	串联补 偿度	额定容量 / Mvar	额定电 压 /kV	保护水 平 / p.u.
106.4	0.40	500	100	2.3

表 2 串联补偿装置 MOV 参数

额定电压 / kV	持续运行 电压 /kV	最大吸能 / MJ	保护水平 / p.u.
113	94	50	2.3

图 2 所示。串联补偿装置发生自触发行为条件有 2 个:间隙因放电分散性自击穿或触发装置产生触发脉冲。为甄别自触发行为的原因,开展间隙放电分散性研究。

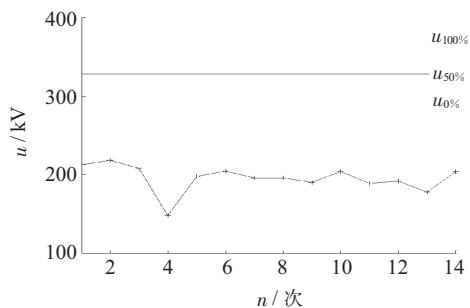


图 2 放电间隙放电电压情况

2 放电间隙电场不均匀度分析

由于放电间隙为空气间隙,其放电特性与电场的均匀程度密切相关,通过分析空气间隙的电场不均匀度,可为放电特性试验提供参考。

2.1 放电间隙击穿原理

放电间隙是串联补偿装置的核心部分之一,由主间隙 G_1, G_2 组成,其结构如图 3 所示。

正常条件下,2 个串联的主间隙 G_1, G_2 参数一致,分别承担串联补偿电容器组两端电压的 1/2。线路发生故障时,电容器两端出现较大的暂态过电压,触发控制系统向脉冲变压器 T_1 和 T_2 发出点火脉冲,经升压后

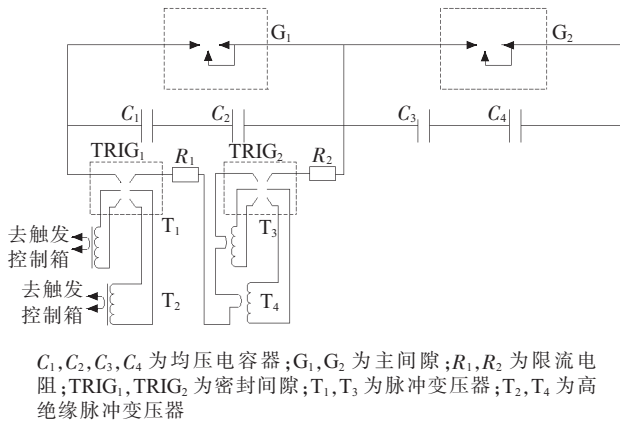


图3 间隙及触发装置工作原理图

使密封间隙 $TRIG_1, TRIG_2$ 火花塞对球面放电。 C_1, C_2 两端的电压迅速降低, 主间隙 G_2 上的电压快速升高, 主间隙 G_2 发生击穿, 电容器组两端电压迅速击穿间隙 G_1 , 使得串补电容器组被旁路^[9], 因此, 放电间隙 G_1, G_2 的放电分散性非常关键。

串联补偿装置主间隙 G_1 的结构如图 4 所示, 包括球形电极 g_1 、球形电极 g_2 、球形电极 g_3 、球形电极 g_4 , 其半径分别为 r_1, r_2, r_3, r_4 。其中, 球形电极 g_1 、球形电极 g_4 通过外层铝屏蔽相连; 球形电极 g_2 、球形电极 g_3 通过钢管相连。球形电极 g_1 、球形电极 g_2 的间距 d_1 很近, 构成主放电通道, 球形电极 g_2 、球形电极 g_4 构成引弧通道。球形电极 g_2 、球形电极 g_3 通过穿墙套管与主间隙 G_2 相连。

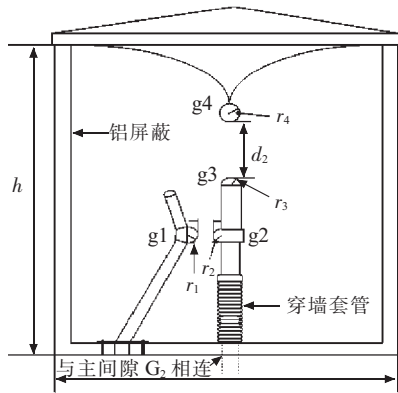


图4 主间隙结构图

2.2 主间隙电场计算

以图 1 所示的 500 kV 固定式串联补偿装置间隙为例, 其主间隙的各参数如表 3 所示, 采用 ANSYS 对间隙的电场分布进行计算^[10], 分析其电场不均匀度。假设在球形电极 g_1 上施加 100 kV 工频交流电压, 球形电极 g_2 设置为零电位, 间隙电场分布如图 5 所示, 电极 g_1 和 g_2 之间场强分布曲线如图 6 所示。

表3 串联补偿装置主间隙参数 mm

参数	r_1	r_2	r_3	r_4	d_1	d_2	l	h
间距	210	200	210	215	62	260	2500	2300

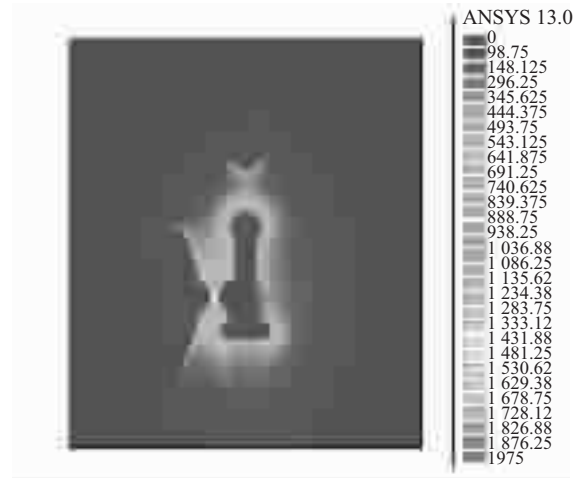


图5 主间隙电场分布图

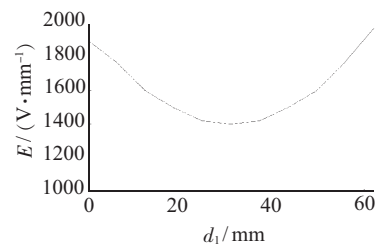


图6 主间隙空间电场分布曲线图

由图 6 可知, 两侧球电极表面最大场强基本相当, 中部空间场强最低。当 $d_1=62$ mm 时, 主间隙最大场强为 1975 V/mm, 最小场强为 1400 V/mm, 平均场强为 1688 V/mm, 间隙电场不均匀系数 $f=1.17$, 空间电场不均匀度很小, 为稍不均匀电场。调整间隙间距 d_1 值, 获得不同间距下的间隙空间电场强度最大值, 如图 7 所示。

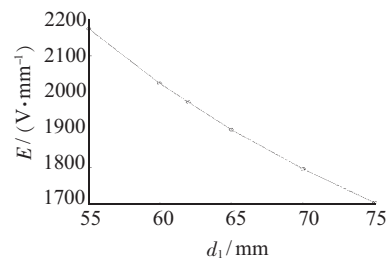


图7 不同间距下主间隙空间电场场强最大值

由图 7 可知, 间隙间距 d_1 在 [55 mm, 70 mm] 之间与空间电场强度基本呈反比线性关系, 且均匀度较好。

3 主间隙放电特性试验研究

以主间隙 G_1 为例, 搭建主间隙工频放电特性模拟试验平台, 如图 8 所示。其中, 电源采用工频电压发生器^[11], 输出电压幅值最高可达 600 kV; 阻尼电阻值为 100 k Ω ; 高压电极与试品间加装电容分压器, 分压器低压侧安装峰值电压表, 测量放电电压峰值; 主间隙由支柱绝缘子固定。不同间距下主间隙 G_1 放电电压值如图 9 所示。环境相对湿度 78%, 温度 26 $^{\circ}\text{C}$ 。

由图 9 试验结果可知: (1) 主间隙放电电压值随着间隙间距的增加而增大, 当间隙间距增加 1 mm 时,

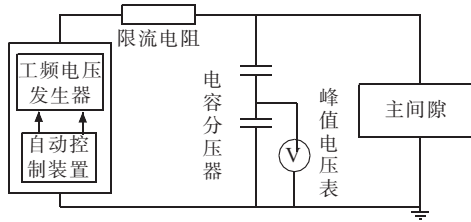


图8 试验回路示意图

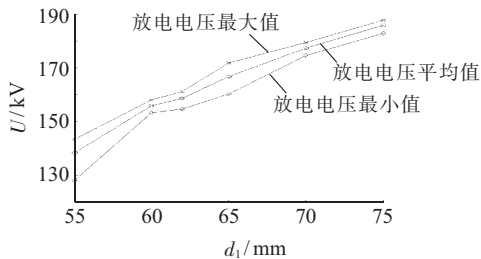


图9 不同间距下主间隙放电电压值

放电电压平均增大约 2 kV。(2) 主间隙中 d_1 在 [55 mm, 70 mm] 之间放电电压分散性较小, 当间隙间距为 55 mm, 60 mm, 62 mm, 65 mm, 70 mm, 75 mm 时, 放电电压偏差分别为 7.5%, 1.7%, 2.5%, 3.9%, 1.6%, 1.6%, 与仿真结果较为接近。针对图 1 所示的串联补偿装置, 取间距 $d_1=62$ mm 时, 主间隙 G1 和 2 个间隙 G1 串联后的放电电压值如表 4 所示。

表4 间隙放电电压值 kV

间隙	最大值	最小值	平均值
G1	161.1	154.6	158.6
G1+G1	329.8	301.6	315.7

由表 4 可知:(1) 主间隙 G1+ G1 串联后放电电压值约为单个间隙 G1 的 2 倍, 放电电压基本为线性增长关系。(2) 当 $d_1=62$ mm 时, 两间隙串联后放电电压平均值为 315.7 kV, 与串联补偿装置的整定值相差 1.8%, 说明间隙击穿整定值是基于实际放电值设定。

4 结束语

(1) 串联补偿装置主间隙三维立体仿真表明, 主间隙电场不均匀系数 $f=1.17$, 为稍不均匀电场, 电场不

均匀度很小。

(2) 主间隙 G1 试验结果表明在 [55 mm, 70 mm] 之间时, 间隙的放电分散性较小, 放电电压较为稳定, 与仿真结果一致。

(3) 两间隙串联后的试验结果表明当 $d_1=62$ mm 时, 串联补偿装置放电间隙的放电电压平均值与整定值相当, 且远大于历次自触发过程中的放电电压最大值, 故放电间隙因放电分散性自击穿的可能性较小。

参考文献:

- [1] 蒋卫平, 李新年, 吕鹏飞, 等. 500 kV 固定串补人工光单相接地故障试验现场实测结果分析与仿真计算[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 17-21.
- [2] 周启文, 潘勇斌, 王德昌, 等. 500 kV 串补系统中火花间隙系统研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 40-44.
- [3] 吴熙, 蒋平. 可控串联补偿抑制次同步谐振的研究[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(2): 21-25.
- [4] 汤广福, 李功新. 先进电力电子技术在超高压输电网中的应用[J]. 变流技术与电力牵引, 2006(2): 28-34.
- [5] 王维洲, 彭夕岚, 何世恩. 成碧 220 kV 可控串补装置的运行与维护[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 50-55.
- [6] 李晔, 井伟. 超高压输电线路串联补偿电容器的运行分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2006(4): 8-12.
- [7] 曹继丰. 平果可控串补工程及其在南方电网中的作用[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 6-9.
- [8] 郭剑波, 武守远, 李国富, 等. 甘肃成碧 220 kV 可控串补国产化示范工程研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 12-17.
- [9] 祝谦, 刘相枪. 平果可控串补本体保护介绍[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 73-77.
- [10] 王泽忠. 工程电磁场[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 35.
- [11] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高电压工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 86.

作者简介:

林敏(1956), 男, 福建福州人, 高级工程师, 从事电力系统分析、工程设计、电网设备运行维护技术研究及管理工作;

李杰(1963), 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 从事高电压、输电技术研究及管理工作。

Research on Self-triggering and Spark Gap Discharge Dispersion of 500 kV Series Compensator

LIN Min¹, LI Jie²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: During the operation of the fixed series compensator of Shanbao-to-Dongming extra high voltage transmission lines of East China, the spark gap would trigger itself unexpectedly, which may result in bypass of the series compensator, in some cases even cause the trip-out of the transmission lines. In this paper, the structure of the fixed series compensator is firstly illustrated. Then a statistics analysis of the actions of the spark gap in the last 6 years is carried out. Afterwards, a three-dimensional model of the main gap is established in the ANSYS. The dispersion of the discharge with various spark gap is investigated. The experimental system for the discharge is build up with the main gap scale as same as the real one. The test results show that the dispersion of the discharge voltage is small, which is in agreement with the experimental date afforded by the supplier.

Key words: series compensator; main gap; overvoltage; finite element; discharge dispersion