

同轴型场畸变气体火花开关的研制

梁天学, 丛培天, 关颖, 蒯斌, 林东生, 张众

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

Development of Gas Switch with Coaxial Field Distortion Electrodes

LIANG Tian-xue, CONG Pei-tian, GUAN Ying, KUAI Bin, LIN Dong-sheng, ZHANG Zhong

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

摘要: 介绍了为 DPF-300 型脉冲电流源同步放电系统研制的同轴型场畸变火花开关。通过电场数值计算, 对场畸变火花开关的设计进行了验证, 对开关的自击穿特性及触发特性进行了实验研究。试验表明, 所设计的同轴型三电极场畸变气体火花开关与原 DPF-200 型所用开关相比, 具有电感小、触发特性好等优点, 已成功地应用于 DPF-300 型脉冲电流源的同步放电系统。

关键词: 气体火花开关; 放电; 触发

中图分类号: TM835

文献标识码: A

Abstract: The gas switch with coaxial field distortion electrodes used in type DPF-300 current pulse discharge system is introduced. The field analysis of the electrodes is carried out for switch design. The experimental results of static and transient property show that the switch with low inductance is good enough to work for the entire type DPF-300 discharge system.

Key words: gas switch; discharge; firing

1 引言

开关是脉冲功率系统的主要部件之一, 具有耐受电压高、导通电流大、击穿时延短、抖动小、电感和电阻小、电极烧损小等不同性能的各种类型开关的研制, 是脉冲功率技术中的重要研究内容^[1,2]。同轴型场畸变开关是一种闭合气体开关, 通常它是由两个主电极和一个触发电极组成, 触发前, 主电极间施加预先设置的电压, 开关不放电, 触发时刻, 触发脉冲引起触发电极与主电极之间电场的强烈畸变, 间隙迅速放电, 开关导通。

笔者介绍了为 DPF-300 型脉冲电流源同步放电系统研制的同轴型场畸变火花开关, 通过电场数值计算, 验证了场畸变火花开关设计, 并对开关的自击穿特性及触发特性进行了实验研究。

2 开关的设计

2.1 场畸变开关原理

场畸变开关的工作原理是利用触发脉冲作用下电场强烈畸变引起开关迅速放电导通, 其工作原理从图 1 可看出: 首先给储能电容器 C 充电到 U_0 , 此时开关高压电极 A 的电位为 U_0 , 低压电极 B 的电位为零, 触发电极 T 位于 A, B 电极之间的等位面上, 充有相应的电位, T 位于 $1/3$ 电位处, 此时, A, B 电极之间的电场不因 T 的存在而改变, 其间的电场比较均匀。图中短路间隙 D 以及隔离电容 C_g 起着触发开关的作用, 在短路间隙未动作之前, T 上电位为 $U_0/3$, 短路间隙高压电极 (E 点) 电位为 U_0 , 当 D 得到一个负脉冲触发信号击穿短路后, E 点电位突变为零, 在 C_g 一端 F 点产生一个 $-2U_0/3$ 的电压波向 T 传播, 当到达 T 后, 由于其开路形成全反射, 在 T 上就得到一个 $-4U_0/3$ 的脉冲, A, T 之间的电位差由原来的 $2U_0/3$ 突变为 $7U_0/3$, 比原来的电位差提高了 3.5 倍, 而 T, B 之间的电位差变为 $4U_0/3$, 开关电极间电场发生畸变, A, T 之间迅速击穿导通; 这时, T, B 之间电位差变为 U_0 , 也会很快击穿导通, C 通过开关对负载放电。

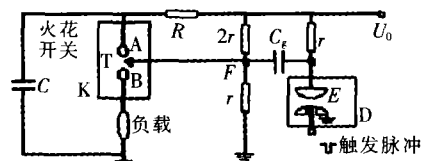


图1 场畸变开关的工作原理示意图

2.2 开关设计

由于同轴型场畸变开关放电时能够构成辐射状的火花放电通道, 并可与电容器构成同轴型连接, 可以使开关火花电感和连接电感到最小, 因此选用同轴型场畸变开关作为 DPF-300 脉冲电流源同步放电系统中的放电开关。开关结构见图 2, 其电极间场分布可认为是稍不均匀场。在标准大气情况下, 从均匀电场的试验数据可知, 场强峰值达到 30 kV/cm

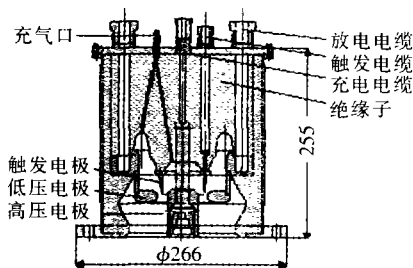


图2 开关结构示意图

时,间隙将击穿。因此可以认为,稍不均匀场中最大场强峰值达到临界值 $E_0=30 \text{ kV/cm}$ 时,间隙也将击穿,击穿电压可根据下式估算^[3],即:

$$U_b = E_0 d / f = 30 d / f$$

式中: d 为电极间距离(cm); f 为不均匀系数。

考虑到多个开关同时运行,设计时取安全系数1.5,不均匀系数 $f=1.2$,标准气压下击穿电压取37.5 kV,开关间距为15 mm,通过调节开关气压工作,电压范围20~50 kV。这种结构的开关具有电感小、通流能力强、工作范围宽、触发性能稳定的优点,单个开关形状电感估算约为34 nH。开关高压电极、低压电极采用普通钢材料,考虑到触发电极为刀口状,在开关放电过程中烧蚀情况比较严重,采用耐烧蚀的不锈钢材料,绝缘子采用高压聚乙烯材料,开关外筒及盖板采用普通钢。

由于场畸变开关的工作原理是利用触发脉冲作用下电场强烈畸变引起开关迅速放电导通,因此研究开关电极间的场分布就特别重要。开关设计完成后,为了解开关的电场分布,对开关进行了静电场模拟。根据开关实际应用情况,模拟时,静态情况下高压电极施加45 kV电压,触发电极施以15 kV电压;触发情况下高压电极施加45 kV电压,触发电极施以-60 kV电压,分别得到其等位线分布见图3。可以看出,静态时,间隙中电场分布基本均匀;触发时,高压电极和触发电极间电场强烈畸变,引起开关间隙击穿放电。开关触发电极尖端平面的电场分布见图4,假定开关触发电极处触发前场强为 E_0 ,触发时场强为 E_1 ,定义 $K=E_1/E_0$ 为场畸变系数。 K 反映了触发时场畸变间隙电场畸变的程度。从图4可看出, $K \approx 7.4$ 。由此可见,开关间隙中电场畸变的程度是相当可观的,这对于减小开关的放电时延和分散性都是极为有利的。

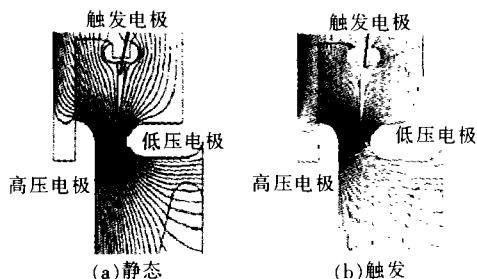


图3 开关电场等位线分布

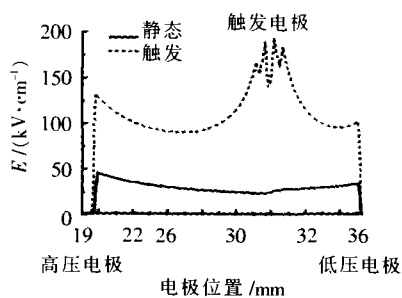


图4 开关触发电极尖端平面电场分布图

3 实验结果

静态试验的目的是检验开关的自击穿特性及其稳定性,试验原理见图5,图中 $C=6.02 \mu\text{F}$, $R=5.01 \text{ M}\Omega$, K 为三电极场畸变型触发开关,绝缘介质为干燥压缩空气,负载为一电炉丝($R=25 \Omega$, $L=15 \mu\text{H}$), G 为静电电压表。采取放电后每间隔3 min 充电一次,在自击穿电压相对稳定以后,取连续10次自击穿电压值作为统计样本。从图6开关自击穿电压与气压(绝对压力)的关系可以看出,开关自击穿电压随开关气压的增大线性增大。定义开关平均自击穿电压为 U_b ,自击穿电压标准偏差为 σ_s ,归一化标准偏差为 $\xi=\sigma_s/U_b$ ^[5]。从试验数据可得,在0.1~0.13 MPa(绝对气压)范围内, $\xi \leq 2.59\%$,可见开关耐压稳定性良好。

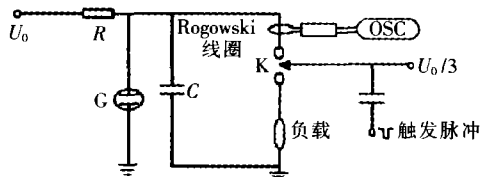


图5 试验原理图

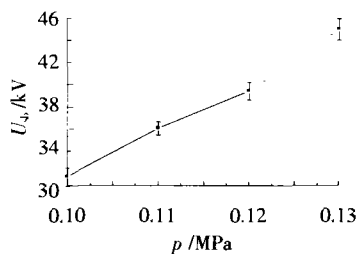


图6 开关自击穿电压与气压的关系

在脉冲功率技术中,开关性能的另一个指标就是开关的触发特性,开关触发特性可用开关时延 t_d 和开关的分散性(或称抖动时间 t_j)两个参数来表示。所谓触发特性好,就是 t_d 和 t_j 小,尤其是 t_j 小。试验电原理见图5。试验中 U_0 分别取45 kV和20 kV,触发脉冲为幅值18 kV,上升沿1 kV/ns,脉宽40 ns。从图7可以看出,火花开关在45 kV,0.24 MPa(考虑到多个开关同时运行,充气气压略高)下 $t_d \approx 27 \text{ ns}$ (扣除触发电缆延时60 ns);火花开关在20 kV,0.24 MPa下 $t_d \approx 61 \text{ ns}$ (扣除触发电缆延时60 ns);从表1开关的分散性试验数据可以看出,同轴型场畸变火

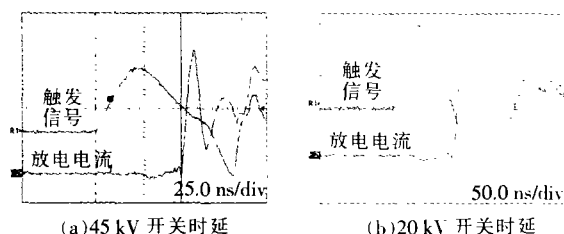


图7 开关时延

表1 开关时延分散性

电压/kV	气压/Ma	5次试验 t_d /ns	平均 t_d /ns	抖动时间 t_j /ns	DPF-200 t_d /ns	DPF-200 t_j /ns
20	0.14	62, 72, 66, 60, 66	63.2	6.0		
30	0.20	48, 44, 50, 48, 42	46.4	4.0	60~80	±10
45	0.24	27, 24, 22, 27, 29	25.8	3.5		

火花开关从 20 kV 到 45 kV 分散性都较小, 由此可以得出: 火花开关 t_d 和 t_j 都小于 DPF-200 开关。

同时, 简单地测量了开关的电感, 其方法是通过谐振法测量回路放电周期, 计算出回路总电感, 减去外电路电感即为开关的电感。试验原理图仍如图 5, 负载换为 DPF-300 型脉冲电流源开关放电用的 8 根 4 m 长的聚乙烯同轴电缆 (168 nH/m, 240 pF/m) 并联。从图 8 可以看出, 短路放电周期为 $T=6.28 \mu\text{s}$, 计算得回路总电感 166 nH, 其中高压电容器的电感约为 40 nH, 8 根 4 m 低电感高压电缆并联电感为 84 nH, 扣除螺钉等连接电感和杂散电感, 开关的电感量小于 42 nH。

4 结论

通过开关初步的试验结果, 得到该同轴型三电

(上接第 108 页)

断。实际运行经验表明, 计算偏差在指纹偏差的 1.5 倍的范围内都可认为机械状态正常。

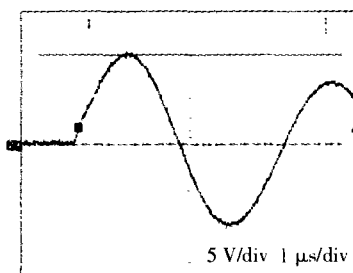
7 相关说明

(1) 信号采集板采样时各路信号用同一个 A/D 分时循环采样, 建议采用采样频率较高的 A/D, 保证各路信号采样的同时性。

(2) 前 5 次指纹波必须“就地产生”^[1], 是指指纹波必须待各种传感器 (尤其是振动传感器) 永久性的安装就绪后才能录取产生。若是传感器的位置有变动或者脱落后在同一位置第 2 次安装都必须重新录取指纹波形。

(3) 上下位机之间的通讯采用主从式或者举手式均可。一旦断路器有动作, 数据采集板 (下位机) 即开始录波, 所录波形实时传至上位机, 上位机对数据进行分析处理, 得出结论。因此, 该方法可以实时在线监测断路器的机械状态, 其监测结果比离线测量结果更接近断路器的真实状态。

(4) 机械状态的在线监测可以很容易的和电寿

图8 短路电流波形 (Rogowski 线圈系数 $k=13\ 077$)

极场畸变气体火花开关的主要技术指标为: ①单个开关电感小于 42 nH; ②工作电压范围 20~50 kV; ③单个开关在相同放电回路、相同条件下连续触发放电, 其放电时延及其分散性都比较小。

综上所述, 所设计的同轴型三电极场畸变气体火花开关与原 DPF-200 所用开关相比, 具有电感小、通流能力强、工作范围宽、触发特性好等优点, 已成功应用于 DPF-300 型脉冲电流源的同步放电系统。

参考文献:

- [1] 李正瀛. 脉冲功率技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [2] 韩旻. 强电流脉冲放电技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [3] 朱德恒, 严璋. 高电压绝缘 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [4] 李洪涛. 200 kV/100 kA 环形轨道式场畸变开关[A]. 第 8 届高功率粒子束暨高压学术交流会论文集[C]. 三亚, 2001.

作者简介: 梁天学 (1974-), 男, 工程师, 主要从事高功率脉冲电源技术研究。

命、辅助回路以及 SF₆ 状态的在线监测融合起来, 组成一个功能完善的断路器在线监测系统。

(5) 该整套断路器在线监测诊断系统已经在湖北荆州、山东青岛等地的多家变电站安装运行, 并取得了满意的运行结果。

参考文献:

- [1] 刘全志, 师明义. 高压断路器在线状态检测与诊断技术[J]. 高电压技术, 2001, 27(5): 29-31.
- [2] 陈新喜, 王章启. 高压断路器机械诊断技术的评述 [J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 47-49.
- [3] A A Polycarpou, A Soom, V Swarmakar, et al. Event Timing and Shape Analysis of Vibration Bursts from Power Circuit Breakers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(2): 848-852.
- [4] 沈力, 黄瑜珑, 钱家骊. 高压断路器机械状态监测的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 113-117.
- [5] 关永刚, 黄瑜珑. 基于振动信号的高压断路器机械故障诊断 [J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 66-68.

作者简介: 姚月娥 (1979-), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压断路器状态在线监测与诊断。