Study on Breaking Performance of Circuit Breaker Based on the Technology of Radiation Electromagnetic Wave Monitoring*

*YU Hua**, *LIU Hong*, *LIANG Jizhong*, *NIU Shu*, *HU fan*
(*State Grid Shanxi Electric Power Company Electric Power Research Institute*, *Taiyuan Shanxi* 030001, *China*)

Abstract: In the process of circuit-breakers breaking the current, there will be breakdown between moving and fixed contacts when the voltage between the contacts of interrupter is higher than the breakdown voltage of the arc extinguishing medium, which will generate switch arc and excite high-frequency electromagnetic wave in space to radiate outward. The high frequency electromagnetic wave signal radiated to space is related to many factors such as arc extinguishing gas characteristics, mechanical characteristics and insulation structure, which reflects the breaking capacity of the circuit breaker. This article simulates and calculates the process of circuit breakers radiating electromagnetic waves, establishes an experimental research platform, measures and compares the waveforms of radiated electromagnetic waves during the opening and closing of new contacts and decommissioned contacts, and conducts research on the breaking performance of high voltage circuit breakers based on radiated electromagnetic wave monitoring technology. The research results show that with the increase of the degree of ablation on the surface of the contact, the breaking performance of the circuit breaker decreases, and the arc re-ignition is more likely to occur. The arcing time will increase significantly compared to the new contact, and the duration of the externally radiated electromagnetic waves will also increase. The duration of the radiated electromagnetic wave can be used as a criterion for judging the breaking performance of the circuit breaker. The research content of this paper provides technical reference and basis for the evaluation of the radiated electromagnetic wave monitoring technology in the circuit breaker opening performance.

Key words: circuit-breakers; radiation electromagnetic wave; interrupter; breaking performance
EEACC: 1210; 8370; 7310 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.029

基于辐射电磁波监测技术的断路器开断性能研究*

俞 华*, 刘 宏, 梁基重, 牛 曙, 胡 帆
(国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘 要: 断路器在开断电流时, 当触头两端的电压高于触头间灭弧介质的击穿电压时, 动静触头将发生击穿, 产生开关电弧, 并激发空间高频的电磁波向外辐射。向空间辐射的高频电磁波信号与灭弧气体特性、机械特性及绝缘结构等多种因素相关, 反映着断路器的开断能力。本文仿真计算了断路器辐射电磁波的过程, 建立试验研究平台, 测量对比了全新触头和退役触头开断过程中辐射电磁波的波形, 开展了基于辐射电磁波监测技术的高压断路器开断性能研究。研究结果表明: 随着触头表面烧蚀程度的增加, 断路器开断性能下降, 更容易发生电弧重燃, 燃弧时间相对于全新触头会有明显的增加, 同时对外辐射电磁波的持续也增多, 辐射电磁波的持续时间可以作为判定断路器开断性能的判据。本文的研究内容为辐射电磁波监测技术在断路器开断性能的评估提供了技术参考与依据。

关键词: 断路器; 辐射电磁波; 灭弧室; 开断性能
中图分类号: TN571.2; TM930 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2021)01-0152-05

断路器在电网中数量庞大, 起着控制和保护的作用, 一旦发生故障, 将引起严重后果[1-2], 断路器性能的检测与评估具有重要意义。当前高压交流断路器的状态评估方法都是针对断路器某一种特性进行的, 如机械、绝缘、温升[3-9]。但实际断路器开断能力, 即灭弧能力, 是各特性综合作用的结果, 实际现场测试中, 需要在断路器停电时开展多种试验, 对断路器状态进行评估, 操作繁琐, 成本高昂。而传统

项目来源: 国网山西省电力公司科技项目(52053017000M)
收稿日期: 2020-03-25 **修改日期**: 2020-07-07

的断路器电寿命曲线评估方法是考虑了开断电流对灭弧室内烧蚀作用的积累效应,不能够反应断路器内部的突发性故障。

断路器在开断电流时,当触头两端的电压高于触头间灭弧介质的击穿电压时,动静触头将发生击穿,产生开关电弧,并激发空间高频的电磁波向外辐射。研究表明经过多次烧蚀的断路器,触头表面尖刺形成的不均匀电场和灭弧室内产生金属颗粒将导致放电过程中激发簇状电磁波信号,断路器开断过程辐射至空间中的电磁波信号信息丰富,利用辐射的电磁波信号可评估断路器的灭弧特性[10-13]。

灭弧特性是断路器开断能力的直接表现,是断路器最重要的性能。断路器在电网中数量庞大,我国电网已发生多起因灭弧性能劣化而导致的安全事故,灭弧特性缺乏有效评估检测手段已成为重大安全隐患之一。断路器开断过程中会向外辐射电磁波信号,该信号是断路器多种特性综合作用的结果,含有丰富的灭弧特性信息,挖掘辐射电磁波信号特征与灭弧特性劣化间的关联性特性,建立灭弧特性缺陷判定依据,可以为断路器灭弧性能的现场评估提供必要的技术支持。

1　基于辐射电磁波的断路器开断性能仿真分析

1.1　仿真模型建立

以电力系统中实际使用的 126 kV 断路器灭弧室为例,根据灭弧室的绝缘外壳、动弧触头、动主触头、静弧触头、静主触头、导电杆的尺寸建立如图 1 所示的有限元求解模型。求解域设置成球型,使灭弧室完全置于求解域内,模型的边界是空气,设定其边界条件为磁绝缘。

上述求解模型各部件所选用的材料及其属性设定如下:(1)灭弧室内介质材料设置为 SF_6,相对介电常数为 1.002;(2)灭弧室外壳到求解域介质材料设置成空气,相对介电常数为 1.0;(3)动静弧触头材料设置为 CuW80 合金材料;(4)动静主触头材料设置为铜镀银合金材料;(5)喷口材料设置成聚四氟乙烯,相对介电常数为 2.1,泊松比为 0.4;(6)支柱式绝缘子瓷套采用电工陶瓷,介电常数设置为 7.5。

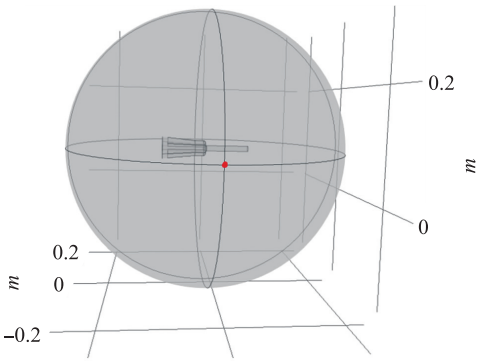


图 1　求解模型

1.2　仿真结果分析与讨论

断路器燃弧过程高频放电的模拟是电磁波模型研究的核心,本文应用高斯脉冲电流信号模拟断路器开断过程中出现击穿所导致的高频放电电流。通过改变高斯脉冲电流信号的峰值、脉宽和数量来分别模拟断路器开断过程中所产生高频放电电流的大小、持续时间和击穿次数。高斯脉冲函数的表达式为:

$$f(t)=a\times e^{-[(t-b)/c]^2} \tag{1}$$

式中:a 代表脉冲峰值,b 代表峰值出现点,c 代表脉冲宽度。改变这三个参数就可以改变信号峰值峰值时刻和脉宽,同时多个脉冲信号可通过施加多个脉冲激励来实现。将高斯脉冲电流信号作为激励源设置在静弧触头表面,在灭弧室模型外侧正对静弧触头表面 0.25 m 处,放置探针监测空间中的电势变化,研究断路器燃弧过程中灭弧室外部空间的电磁波信号。

改变式(1)中的 a 值,可以得出低峰值脉冲和高峰值脉冲的激励源下,测试点低峰值激励源时检测到的信号约为 1 V,高峰值时的信号峰值约为 1.5 V,获得的波形分别如图 2(a)和图 2(b)所示。

改变式(1)中的 c 值,可以得出窄脉冲和宽脉冲的激励源下,测试点窄脉冲激励源时脉宽为 2 ms 左右,宽脉冲激励源时脉宽为 8 ms 左右,获得的波形分别如图 3(a)和图 3(b)所示。

设置两个高斯脉冲激励源,改变式(1)中的 b 值,使两个信号分布在不同的时间区间上,一个设置在

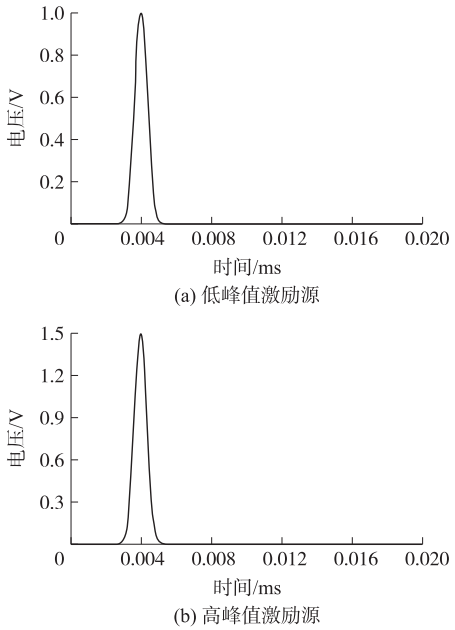


图 2　不同脉冲峰值下测试点电压波形

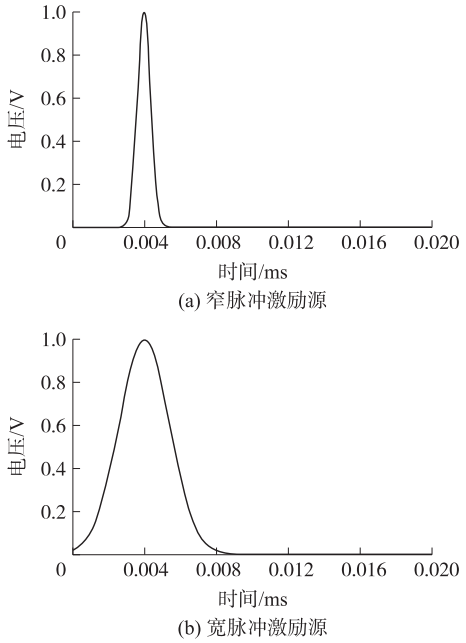


图 3 不同脉冲宽度下测试点电压波形

4 ms 位置处,一个设置在 12 ms 位置处。模拟了两种不同脉冲宽度的激励源信号,当脉冲间隔为 6 ms,脉冲宽度为 2 ms 时,检测到的辐射电磁波信号不重叠;当脉冲间隔为 8 ms,脉冲宽度为 8 ms 时,检测到的辐射电磁波信号有交迭现象。测试点获得的波形分别如图 4(a)和图 4(b)所示。

通过对仿真结果的分析,可以得出放电脉冲强度越大,辐射电磁波的信号峰值越高。放电脉冲宽度越大,辐射电磁波信号宽度越大。对于多次放电脉冲的情况,当脉冲间隔大于脉冲宽度的时候,检测到的辐射电磁波信号无交迭现象,而当脉冲间隔接近脉冲宽度的时候,检测到的辐射电磁波信号有交迭现象。

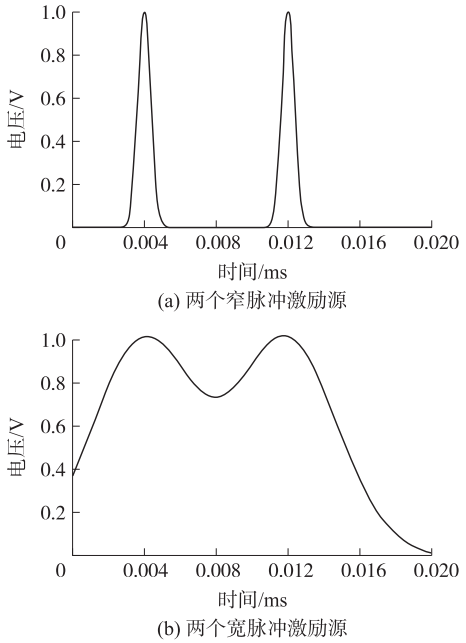


图 4 两次脉冲激励下测试点电压波形

2 基于辐射电磁的断路器开断性能试验研究

2.1 模拟试验平台

在仿真分析的基础上,通过搭建模拟试验平台,研究断路器灭弧室在不同状态下的开断过程中辐射电磁波与开断性能的关系,测量并对比了全新弧触头和退役弧触头开断过程中的辐射电磁波。

试验平台如图 5 所示,主要包括变压器、灭弧室腔体、振动传感器、特高频传感器,电压、电流采集系统以及高速摄像机。其中灭弧室腔体外壳采用有机玻璃,内充 SF_6 气体,方便高速摄像机拍摄断路器内的电弧燃弧情况;振动传感器用于信号采集的触发;测量电磁波的传感器采用特高频传感器,有利于现场电磁波测量时的抗干扰。根据辐射电磁波理论,电磁波信号的产生取决于空间中电流信号的变化率,与电流的幅值没有直接的关系[14],因此模拟试验平台的电源采用试验变压器供电,负载为纯阻性负载,避免了昂贵的合成回路的使用[15-16]。全新弧触头和退役弧触头的外观如图 6 所示,退役触头经过多次开断,表明烧蚀严重。试验中,为了方便高速摄像机的拍摄,拆除了喷口结构[17]。

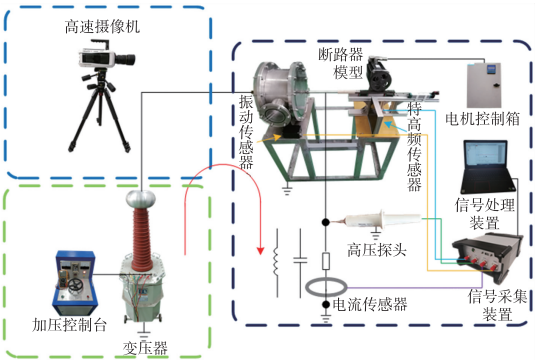


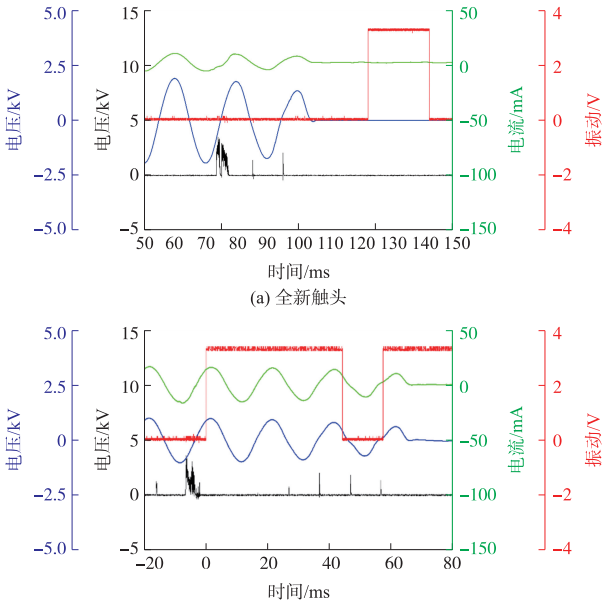
图 5 断路器模拟试验平台

图 6 全新触头和退役触头的外观对比

2.2 试验结果分析与讨论

测量结果如图 7 所示。将辐射电磁波的持续时

间定义为第一个电磁波出现到最后一个电磁波消失。在 2.5 kV 峰值电压的作用下,新触头开断过程中辐射电磁波持续时间为 18 ms,而退役触头开断过程中辐射电磁波的持续时间为 76 ms,明显长于新触头。记录的电流信号表明,在产生电磁波信号后约 2 个工频周期,新触头开断的电流熄灭,而退役触头在产生电磁波信号后约 4 个工频周期开断的电流才熄灭,其灭弧能力明显弱于新触头。

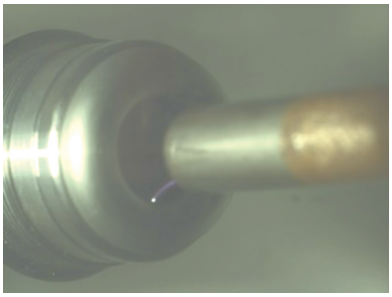


(a) 全新触头

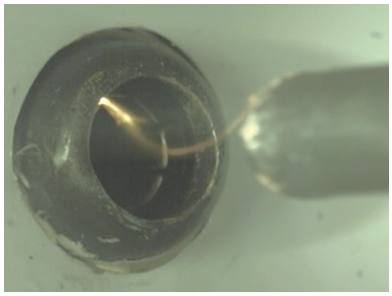
(b) 退役触头

图 7　不同触头开断试验的测量结果

图 8 中给出了高速摄像机记录的触头间电弧熄灭前的外观,可以看出退役触头间的电弧长度明显大于全新触头间的长度,这也说明其灭弧能力和开断性能都显著降低。



(a) 全新触头



(b) 退役触头

图 8　高速摄像机记录的触头间电弧

上述结果的原因在于,退役触头的表面由于多次开断严重烧蚀,存在多处电场不均匀,更容易发生电弧重燃,燃弧时间相对于全新触头会有明显的增加,同时对外辐射电磁波的持续时间也增长。辐射电磁波的持续时间可以作为判定断路器开断性能的判据。

3　结论

本文通过仿真分析和开断试验研究了断路器在开断电流时向空间辐射的高频电磁波信号,并研究了辐射电磁波信号和断路器开断性能的内在关系。通过仿真分析,得出放电脉冲强度越大,辐射电磁波的信号峰值越高。放电脉冲宽度越大,辐射电磁波信号宽度越大。对于多次放电脉冲的情况,当脉冲间隔大于脉冲宽度的时候,检测到的辐射电磁波信号无交迭现象,而当脉冲间隔接近脉冲宽度的时候,检测到的辐射电磁波信号有交迭现象。试验研究结果表明,随着触头表面烧蚀程度的增加,断路器开断性能下降,更容易发生电弧重燃,燃弧时间相对于全新触头会有明显的增加,同时对外辐射电磁波的持续时间也增长,辐射电磁波的持续时间可以作为判定断路器开断性能的判据。

参考文献:

[1]　陈丽娟,胡小正. 2010 年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力,2011,44(6):71-77.

[2]　陈丽娟,胡小正. 2009 年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力,2010,43(5):1-6.

[3]　黄新波,陶晨,刘斌. 智能断路器机械特性在线监测技术和状态评估[J]. 高压电器,2015,51(3):129-134.

[4]　张龙,黄新波,蒋波涛,等. 基于触头行程测量的断路器机械特性在线监测[J]. 西安工程大学学报,2018,32(3):302-310.

[5]　彭在兴,王颂,刘芹,等. 高压断路器分合闸线圈电流采集实验平台与故障模拟实验研究[J]. 高压电器,2018,54(7):248-253.

[6]　Gao W,Ding D,Liu W,et al. Investigation of the Evaluation of the PD Severity and Verification of the Sensitivity of Partial-Discharge Detection Using the UHF Method in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,29(1):38-47.

[7]　吴晗,李时莹,亓彦珣,等. 基于综合赋权与 WRSR 的高压开关柜状态评估方法研究[J]. 高压电器,2020,56(2):47-52.

[8]　李大卫,徐党国,孙云生,等. 基于分合闸线圈电流的断路器缺陷诊断及试验方法研究[J]. 高压电器,2015,51(8):114-118.

[9]　Xue J,Zhang X L,Qi W D,et al. Research on a Method for GIS Partial Discharge Pattern Recognition Based on Polar Coordinate Map[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application(ICHVE). IEEE,2016:1-4.

[10]　气体绝缘变电站内辐射干扰的建模与计算[J]. 华北电力大学学报,2002,29(4):22-25.

[11]　郭飞,孔旭,吴旭涛,等. 330kV 超高压 GIS 开关动作 VFTO 辐射电场的测量与分析[J]. 高压电器,2014,50(9):119-125.

[12] 冯南战,李启,孔旭,等. 330 kV 开关站内隔离开关动作 VFTO 辐射场的测量与分析[J]. 高压电器,2018,54(5):217-222.
[13] 孔旭,谢彦召. 基于光纤技术的电磁脉冲 3 维电、磁场测量系统[J]. 高电压技术,2015,41(1):339-345.
[14] 王泽忠,全玉生,卢斌先. 工程电磁场[M]. 北京:清华大学出版社,2004:72-86.
[15] 裴振江,何俊佳,姚斯立. 特高压断路器的大容量开断试验等价性分析与开断试验方法[J]. 高压电器,2009,49(5):1-5.
[16] GB 4473—2008 高压交流断路器的合成试验[S]. 北京:中国标准出版社,2014:12-19.
[17] 卡普塔诺维克. 高压断路器理论、设计与试验方法[M]. 王建华,闫静,译. 北京:机械工业出版社,2015:313-315.

俞 华(1980—),男,硕士,正高级工程师,主要从事输变电设备试验检测、技术监督和故障诊断工作,yuhua16885@163.com。