第 50 卷 第 10 期：4329-4337 高电压技术 Vol.50, No.10: 4329-4337
2024 年 10 月 31 日 High Voltage Engineering October 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232209

特高压换流变用 550 kV 防爆燃间隙油中电弧转移熄弧性能试验研究

李志兵[1]，李晓昂[2]，张　然[1]，徐晓东[1]，郑占锋[3]，林金阳[1]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；2. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049；3. 国网电力科学研究院有限公司，南京 211000）

摘　要：特高压换流变充油量大，内部短路故障时会产生高能油中电弧，出现大的机械冲击力并产生大量高温高压油气，容易导致油箱结构撕裂和爆炸起火。为此提出在换流变网侧并联 SF_6 间隙，1 ms 内导通并形成低阻气体电弧通道，快速转移熄灭高弧阻油中电弧的防爆燃技术方案，将传统故障清除时间缩短约 80%。油中电弧转移受故障电弧特性的影响，但相关研究主要针对小电流的短油隙(<50 mm)，长距离高能油中电弧特性仍未阐明。该文等效模拟换流变网侧内部放电工况，设计了试验回路、试验方式、油中燃弧模拟装置和高精度试验测控系统，成功开展 6 种方式油中电弧转移熄弧试验，获得了油中电弧特性和间隙转移熄弧能力。试验中设计油隙长度为 250~650 mm，覆盖换流变 500 kV 和 750 kV 网侧最小油隙长度，参考换流站短路电流水平设计试验电流为 20~50 kA、参考换流变保护出口时间设计间隙触发时延控制油中燃弧时间为 2~10 ms。6 次试验中间隙均能在 1 ms 内转移熄灭油中电弧。试验结果分析表明，换流变网侧最小油隙起始弧压不低于 10 kV，随着油隙长度增加，单位长度弧压略微增加；在 10~50 kA 级短路电流下，油中弧压受电流幅值影响很小。该试验表明了间隙转移熄弧防爆燃的可行性和防爆燃间隙设计的有效性，为特高压换流变防爆燃提供了新的解决方案。

关键词：油中电弧；等离子体喷射；SF_6 间隙；电流转移；燃弧特性

Experimental Research of Oil Arc Transferred and Extinguished by AC 550 kV Triggered Gap for UHV Converter Transformer to Prevent Deflagrate

LI Zhibing[1], LI Xiaoang[2], ZHANG Ran[1], XU Xiaodong[1], ZHENG Zhanfeng[3], LIN Jinyang[1]
(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. State Grid Electric Power Research Institute , Nanjing 211000, China)

Abstract: The internal short-circuit faults of extra-high-voltage converter with large oil filling can produce high-energy oil arc, accompanied by great mechanical impact and a large amount of high-temperature and high-pressure oil gas, which can easily lead to structural tearing of the tank and explosion. By paralleling a high pressure SF_6 gap triggered by plasma injection at the grid side of the converter, a low-resistance gas arc channel can be formed after gap conduction within 1 ms, which is expected to realize the rapid transfer and extinguishment of arc in oil. By using this method, the traditional fault clearing time can be reduced by 80%. The feasibility of current transfer in oil is affected by the characteristics of the fault arc, whereas, the related research is mainly carried out for the short oil gap (a few millimeters to tens of millimeters) with small current, the arc characteristics in oil with long distance and high energy is still not clarified. Therefore, we equivalently simulated the internal discharge faults of the converter, designed a test circuit, test methods, an arc-firing simulation device, and a high-precision measurement and control system, and successfully carried out the tests of arc transfer and extinguishment under six different parameters. The results show that the SF_6 triggering gap can realize the rapid transfer and extinguishment of the arc in oil, with 250~650 mm and 10~50 kA, within 1 ms. The minimum initial arc voltage of the oil gap is more than 10 kV, and the arc voltage of unit length increases slightly with the increase of the oil gap length. The arc voltage is slightly affected by the amplitude of short-circuit current. This paper verifies the feasibility of the technology

基金资助项目：国家电网公司科技项目(特高压大型充油设备故障快速保护及快速清除技术研究) (5500-202355357A-2-1-ZX)。
Project supported by the State Grid Corporation of China (Research on Quick Protection and Quick Clearing Technology for Faults in Ultra High Voltage Large Oil Filling Equipment) (5500-202355357A-2-1-ZX).

scheme of transferring and extinguishing the arc by high pressure SF_6 gap, and verifies the effectiveness of the design of the explosion protection gap, which provides a potential technical route for the explosion protection of UHV converter transformer.

Key words: oil arc; plasma injection; SF_6 gap; current transfer; arc characteristics

0 引言

换流变内部放电故障时会产生油中电弧，大短路电流电弧引起油分解产生高压和高温油气，发展速度快，极易导致油箱结构撕裂和爆炸起火等恶性事故，亟须寻找快速故障清除方法。目前的故障清除方法是通过换流变差动保护控制网侧断路器开断电流，其中换流变差动保护出口时间约为 20 ms、常规断路器开断时间≥50 ms，因此常规故障清除时间约为 70 ms，难以满足防爆燃需求。

快速故障清除可采用快速断路器或直流断路器直接开断故障电流，也可采用阀组或触发间隙快速旁路故障。550 kV 快速断路器将开断时间缩短至 25 ms，快速保护也可将动作保护时间缩短至 15 ms，因此通过快速断路器可将故障清除时间缩短至约 40 ms[1-2]。直流断路器和晶闸管阀组均为电力电子开关，需要大量晶闸管串、并联，其结构和控制复杂，技术参数有限，占地面积大、成本高。

等离子喷射触发间隙作为一种亚毫秒关合开关，具有高绝缘、快导通和大容量通流和快速绝缘恢复的特点[3]。华中科技大学和中国电力科学研究院有限公司联合对真空触发技术、多棒极及纵磁场电极真空电弧控制技术开展研究，设计了 12 kV 和 40.5 kV 真空触发间隙试验样机，工作系数≤5%[4]。西安交通大学杨兰均等人设计了一种大气压下两间隙消融毛细管等离子体喷射装置[5]。黄东等人研究了干燥空气环境下的等离子体射流放电特性[6]。刘轩东等人提出了采用微孔腔内的火花放电烧蚀产气材料产生等离子体喷射触发的方式[7]。大连理工大学搭建了气体间隙的平板电极直流大电流旋弧仿真平台，优化了电极结构，提高了通流能力及弧后绝缘恢复速度[8-9]。中国电力科学研究院有限公司与西安交通大学张乔根联合团队研制了 DC 80 kV/30 kA 气体绝缘密封触发间隙产品，在白江特高压混合直流工程中首次工程应用，触发导通时延为 0.3 ms，实现可控消能装置的快速控制[10]。进一步地又研究了金属丝爆型等离子体喷射触发技术，可以实现兆伏级间隙在 5~10 kV 间隙电压下触通[11-12]。

上述研究和工程应用表明了触发间隙可用于电网超快速控制或故障旁路，在此基础上，提出了本文所述的在换流变网侧并联 SF_6 防爆燃间隙 1 ms 转移熄灭油中电弧以防爆燃的技术方案。

换流变正常运行时间隙可靠绝缘耐受，换流变内部严重短路时，配合换流变小差保护能准确识别换流变内部严重短路故障，间隙在 1 ms 内快速导通并游离形成低阻气体电弧通道，转移熄灭高弧阻油中电弧[13-15]。考虑差动保护加速后动作出口时间缩短至 10 ms，能够将故障清除时间缩短至 11 ms 以内，相比常规故障清除时间缩短约 85%，可有效防止爆燃。换流变内部严重短路时，网侧电压仅剩线路压降和油中电弧电压，非常不利于等离子体的发展，触发设计难度极大，因此需要研究换流变内部最严重情况——直接对地短路下油中电弧特性，掌握间隙触发时油中弧压和弧阻，精准提出间隙触发要求。

在换流变油中电弧特性研究方面，间隙转移熄弧性能与换流变实际油中燃弧特性紧密相关，须开展等效试验验证。经调研发现，目前国内厂家所生产的特高压换流变 500 kV/750 kV 网侧最小油隙距离为 260~480 mm。由于油中燃弧试验会瞬间产生高温高压油气，有爆燃起火风险，因此油中电弧特性研究试验大多为缩比试验，在小于 50 mm 的短油隙中开展小于 100 A 的小容量通流。周远翔等人使用针-板电极开展油中放电试验，设间隙距离为 10 mm，重点关注不同电压下油中起始放电电压和放电后产气特性影响[16]。李博宇等人采用油隙距离为 10 mm 的针板油纸放电模型和油隙距离为 25 mm 的柱板沿面放电模型，在 1 A 左右交变电流下，研究发现弧压呈交变的方波幅值约为 10 kV[17]。近些年针对分接开关故障，国家电网有限公司和中国南方电网有限责任公司相继组织多家单位开展了少数模拟实际分接开关故障的大型油中燃弧试验，中国南方电网有限责任公司在实际分接开关油室中设计了 12 mm 油隙，获得在 25 kA 故障电流下电弧电压为衰减型交变方波、峰值为 400 V 的结论[18]。国家电网有限公司在实际分接开关油室中设计 35 mm 油隙，

获得在 63 kA 故障电流下，电弧电压为衰减型交变方波、峰值约为 2.4 kV 的结论[19]。目前，国内最接近换流变内部燃弧实际的试验为国家电网有限公司组织的换流变升高座区域电弧故障试验，试验样机参考 550 kV 换流变网侧升高座尺寸，电弧长度为 110 mm、试验电流为 20~40 kA。使用铜丝引弧，测得电弧电压初期为 5 kV，后期随着电弧扩散弧压增加至 10 kV[20]。试验重点关注百毫秒以上的电弧能量以及壳体压力，对起弧阶段的电弧特性未关注。综上所述，目前的油中电弧特性研究与间隙转移熄灭油中故障电弧所关注的 260~480 mm 的长油隙下 10~50 kA 短路电流中起始电弧特性相差较远，亟须模拟上述实际对油中燃弧起始阶段的瞬时特性开展模拟实际的试验研究，以研究间隙转移熄弧的可行性和产品设计的有效性。

本文设计间隙通流试验样机和油中燃弧模拟装置，等效模拟了特高压换流变网侧主绝缘最小油隙接地放电的最严重工况，开展了不同油隙距离、电流大小和燃弧时间下油中电流转移熄弧试验，研究间隙转移熄弧性能，并分析研究油中电弧特性。

1　550 kV 防爆燃间隙设计概述

防爆燃间隙工作原理如图 1 所示，接地间隙安装于特高压换流变网侧绕组与交流侧断路器之间，与换流变网侧绕组分相并联。当换流变内部严重短路故障时换流阀会闭锁，间隙能在 1 ms 内触发导通形成低弧阻的 SF_6 电弧通道，将油中故障电流转移熄弧，简单有效防爆燃。550 kV 防爆燃间隙技术参数如表 1 所示。间隙绝缘为换流变 500 kV 网侧绕组绝缘的 1.2 倍。分析以往换流变爆燃事故录波，内部接地短路故障下网侧电压在 10 kV 以上，据此设计间隙能够在最低转移熄弧电压为 6 kV 时，1 ms 内可靠触发导通并形成低弧阻通道，有效转移熄灭油中故障电弧。间隙通流幅值按 63 kA 短路电流计算，通流时间按照常规断路器的开断时间 50 ms 计算，超时可压力释放。

防爆燃间隙采用如图 2(a)所示的 SF_6 气体绝缘、单间隙、复合外套结构方式。采用如图 2(b)所示的金属丝爆等离子体喷射触发技术，电极为平板电极，内嵌可产生等离子体的触发腔实现极低间隙电压下可靠触发并转移熄灭油中电弧。采用如图 2(c)所示的螺旋槽自磁场旋弧电极，配合绝缘防弧罩，实现大容量短路通流及快速绝缘恢复。间隙本体包括复合套管、上下盖板、过渡套管和金属过渡桶。复合外套上方和金属过渡桶下方分别为高、低压触发器。通过供能变提供高电位供能。间隙需要触发时，控制器命令上、下触发器同时输出高压脉冲至上、下电极触发腔，烧蚀触发腔产生高密度等离子体，从电极表面微孔喷出，畸变电场，使间隙快速导通。

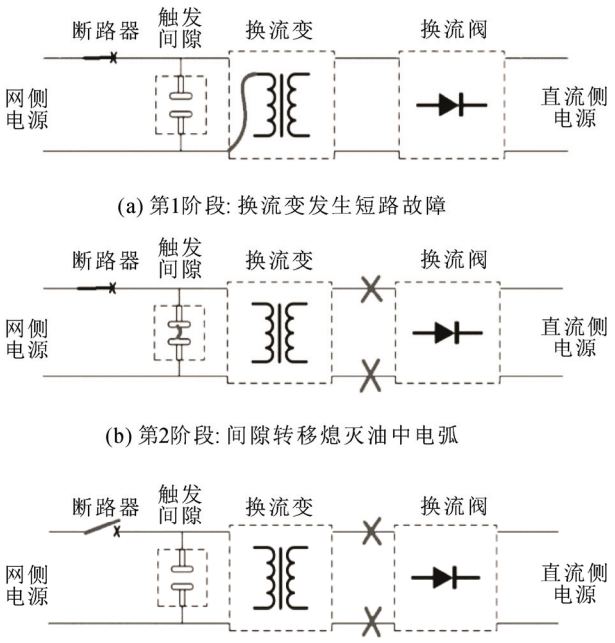


图 1　间隙快速转移熄弧防爆燃原理

Fig.1　Principle of using gap rapid transfer to extinguish arc and prevent detonation

表 1　550 kV 触发间隙关键技术参数

Table 1　Key technical parameters of 550 kV triggered gap

项目		单位	技术要求
额定电压		kV	550
绝缘	雷电耐压	kV	1 860
	操作耐压		1 410
	工频耐压		816
触发	最低可靠转移熄弧电压	kV	6
	导通时延	ms	1
通流	额定短路通流	kA	63
	持续时间	ms	50

2　油中电弧转移试验设计

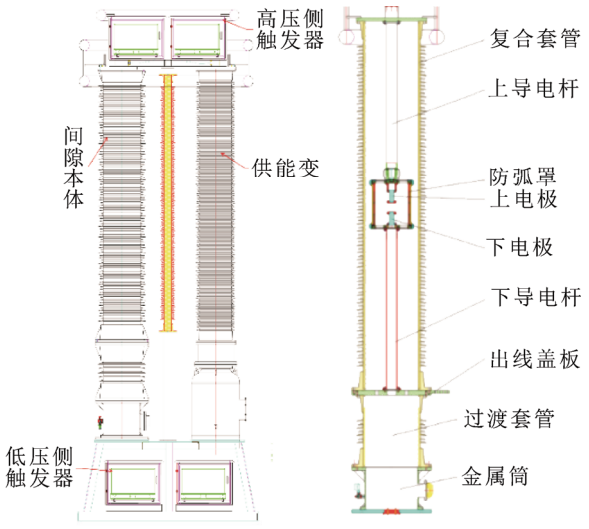
试验目的是验证最严重情况下的换流变网侧内部最小油隙放电，网侧仅剩极低电弧弧压时，间隙能够可靠触通，并实现油中电弧转移熄弧。为了保证试验有效性，试验参数应能够等效模拟实际换流变内部短路故障。在小型低压模拟样机中开展长

油隙燃弧试验还需要考虑可靠引弧和试验安全。试验回路、方式、油中燃弧模拟装置和测控设计分别介绍如下。

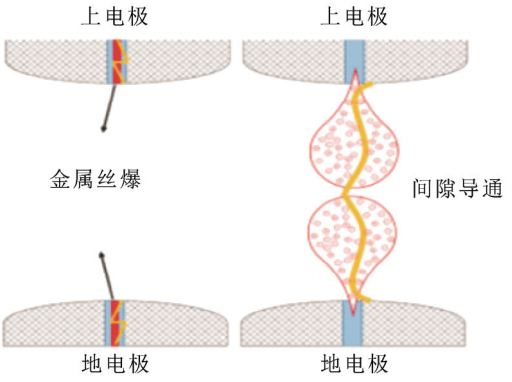
2.1 试验回路

采用如图 3 所示的电路，电源为大容量发电机，试验电压为 12~40.5 kV、试验电流为 50~63 kA，U_1、U_2 为弧压测量用分压器，I_1—I_4 为电流线圈。油中燃弧模拟装置采用熔丝引弧模拟换流变内短路后燃弧。间隙为低压模拟样机，主电极和触发腔与 550 kV 防爆燃间隙设计相同。采用 10 kV 快速断路器用于转移间隙电流来控制间隙通流时间。间隙采用如图 4 所示的金属罐通流试验样机，间隙部分的设计与 550 kV 间隙相同，降低出线套管外绝缘尺寸便于试验布置及拆装等。

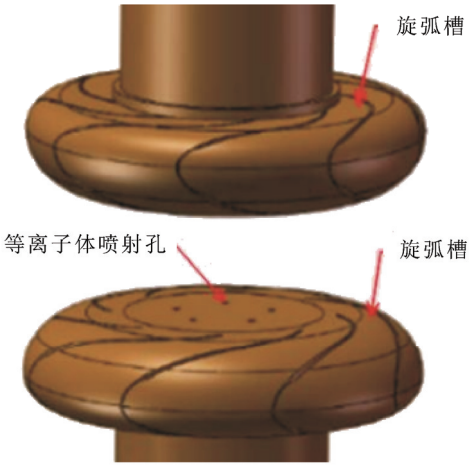
试验前快速断路器为分闸状态，间隙控制器实时监测模拟装置电压、电流和间隙电流，检测到油中电流超过阈值后，延时判断油中弧压满足间隙最低可靠转移电流电压，快速发出间隙触发命令和快



(a) 间隙或套外形及间隙本体内部结构



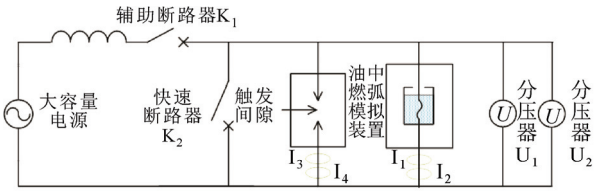
(b) 等离子体喷射触发原理



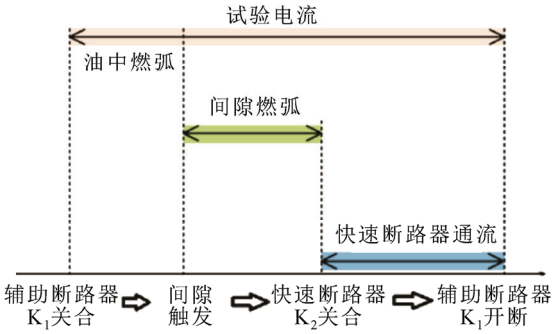
(c) 螺旋槽旋弧电极

图 2 间隙整体设计

Fig.2 Overall and partial structure of the gap



(a) 试验回路



(b) 开关动作顺序

图 3 油中电弧转移熄弧试验回路及开关动作顺序

Fig.3 Oil arc transfered and extinguished test circuit and switching sequence



图 4 金属罐间隙样机结构

Fig.4 Metal can gap prototype

速断路器合闸命令。间隙快速导通转移熄灭油中故障电弧，随后快速断路器合闸转移熄灭间隙电弧。

2.2　试验方式

油隙距离参考表 2 中的特高压换流变 500 kV/750 kV 网侧主绝缘最小油隙，设计试验油隙为 250、450 和 650 mm，可模拟 550 和 750 kV 换流变网侧套管末端接地故障起弧。

根据相关文献资料，超、特高压变压器短路故障时短路电流最高约为 45 kA[21-23]。同时参考以往换流变内部严重接地故障时短路电流为 30~40 kA、分接开关引起绕组尾端对地短路时的短路电流为 22.6 kA。设计试验中短路电流为 20~50 kA，可覆盖换流变内部短路故障工况。

考虑换流变保护中最快的小差速断保护最快出口时间约为 10 ms，若间隙控制器自动检测油中故障电流后可实现控制出口时间约为 2~3 ms，试验中通过设定间隙触发试验控制油中燃弧时间在 2~10 ms 之间。

经以上参数等效性分析，试验可以等效换流变内部严重对地短路放电的油中燃弧工况。为了获得油中燃弧及间隙转移熄弧特性，设置如表 3 所示的 6 种试验方式。方式 1 通过模拟较长油隙燃弧，初步确认间隙转移熄弧性能。将方式 1、方式 2 和方式 3 对比，可以获得不同油隙距离下间隙转移熄弧性能和油中弧压变化。将方式 3、方式 4、方式 5 和方式 6 对比，可以获得不同试验电流下间隙转移电弧性能和油中弧压变化。从方式 6 中还可以获得长燃弧时间下的燃弧转移特性。

为了获得间隙大容量通流下的控弧性能，设计了试验方式 7，不带油中模拟装置仅间隙通流，电流按 500 kV 系统短路电流为 63 kA 的带直流分量通流、燃弧时间按断路器开断时间 50 ms 来计算。

2.3　油中燃弧模拟装置

如图 5 所示，设计油中模拟装置由内、外筒和套管构成。内筒模拟油腔，外筒作为防护。内筒直径为 330 mm、高度为 1 670 mm，高压经套管引入，低压经盆式绝缘子引出。上下电极为弧触头，电极间安装熔丝，大电流下熔丝丝爆引起油中燃弧。长间隙下熔丝容易受热不均发生单点熔断，可能受电动力作用飘开导致引弧失败，因此熔丝选用熔断器专用薄银带，均布狭径使熔丝均匀熔断，利于稳定起弧。内筒内衬绝缘筒、导电杆外套绝缘筒，将电弧控制在电极间，防止飘弧至桶壁。内、外筒均设计防爆膜，用于燃弧后压力释放。内外筒均抽真空防止高温油气燃烧。模拟装置安装在对地绝缘支架上，防止大电流经外壳入地。

表 2　特高压换流变 500 kV/750 kV 网侧最小油隙

Table 2　Minimum oil gap on the 500 kV/750 kV grid side of UHV converter

厂家名称	最小油隙(均压环-升高座)/mm	
	500 kV 换流变	750 kV 换流变
山东电工	257.5	435.5
西安西变	280	370
天威保变	430	480

表 3　等效模拟换流变故障燃弧试验方式

Table 3　Equivalent simulation test method for commutation transformer fault arcing

方式	油隙长度/mm	试验回路参数	间隙触发时延(用于控制油中燃弧时间)/ms
1	650	32.5 kV/40 kA	2
2	450	32.5 kV/40 kA	2
3	250	32.5 kV/20 kA	2
4		32.5 kV/50 kA	2
5		32.5 kV/40 kA	2
6		32.5 kV/40 kA	10
7			50

注：试验方式 7 为不带油隙仅间隙通流 63 kA(含直流分量)。

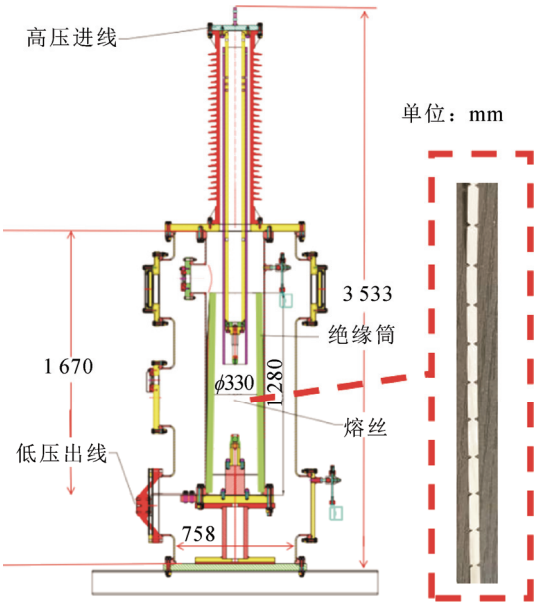


图 5　油中燃弧模拟装置内部结构及熔丝放大图

Fig.5　Internal structure and fuse of oil arc simulation device

2.4　试验测控

试验中测量油中电弧电压和油中故障电流用于判断间隙触发条件，对比油中电流和间隙电流用

于分析电流转移过程。测量设备按照独立双套配置，分别用于高精度录波和试验控制。测量设备布置如图 3 所示，包括模拟装置支路弧压测量用分压器 U_1 和 U_2、模拟装置支路电流线圈 I_1 和 I_2、间隙支路电流线圈 I_3 和 I_4。U_1 和 U_2 为北极星 PVM-5 电阻分压器，频带为 80 MHz。I_1~I_4 为高频带罗氏线圈，频带为 10 MHz。上述测量设备均按照独立双套配置，1 套经同轴电缆送至示波器，示波器使用电池供电，放置于对地绝缘的密封屏蔽箱中，提高抗干扰能力，实现高精度录波；1 套就地转成光信号(高速采样及传输速率为 50 kHz)送至间隙控制器，用于间隙触发和快速断路器合闸控制。

间隙触发逻辑模拟换流变中在最小油隙处放电燃弧，保护检测到故障且间隙电压满足触发需求时命令间隙触发，转移熄灭油中故障电弧的工况，如图 6 所示。正常时油中应为绝缘状态，当出现油中电流时认为出现了短路故障。考虑测量精度，为了防止误触发，将故障电流判断定值 I_0 设定为 2 kA，实测油中电流为 I_1，据此试验中发生油中放电的判据为检测到油中电流 $I_1 \geq I_0$=2 kA；通过设定试验延时 t_1 来模拟控保动作时间——t_1=10 ms 模拟小差速断保护出口、t_1 取 2~3 ms 模拟间隙快速自触发出口。按照间隙触发性能模拟结果，间隙最低可触发电压 U_0=6 kV，实测间隙电压为 U_1，在间隙电压满足 $U_1 \geq U_0$ 时才发出正常触发命令。如果间隙电压一直不满足触发条件的话，为了确认间隙在实际工况中是否能在更低的电压下触发续流，在延时 t_2 时强制触发间隙。为了控制间隙通流时间，在发出间隙触发命令的同时延时 t_3 发出断路器合闸命令，断流器关合后转移电流、间隙熄弧，验证间隙油中电弧转移性能时控制间隙通流时间为 10 ms，验证间隙通流性能时控制间隙通流时间为 50 ms。

3 试验结果分析

3.1 试验结果

6 种方式下间隙均可靠触发导通，并在 1 ms 内转移熄灭油中电弧，试验结果如表 4 所示。

图 7 为试验方式 2 的典型油中电弧转移熄弧波形，以此为例介绍间隙转移熄弧过程，其他几种方式下试验波形与图 8 类似。大电流流过油中模拟装置后 0.3 ms 熔丝丝爆出现暂态电压升高，这是金属丝爆后电阻短暂增加的原因，之后试验电压使油隙再次导通产生油中电弧。油中弧压平均值为 20.4 kV、

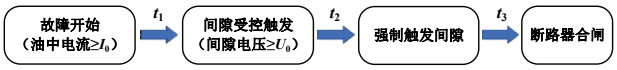


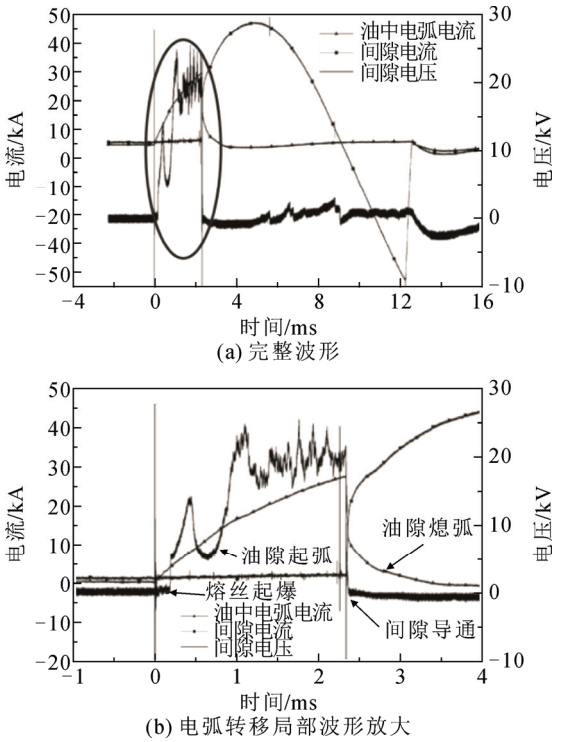
图 6 试验时序控制

Fig.6 Test timing control

表 4 试验结果汇总

Table 4 Summary of test results

参数		数值					
		方式 1	方式 2	方式 3	方式 4	方式 5	方式 6
试验参数	电源电压(有效值)/kV	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5
	电源短路电流(有效值)/kA	40	40	20	50	50	40
	油隙距离/mm	650	450	250	250	250	250
燃弧过程	起弧电压平均值(峰值)/kV	40.2	20.4	12.6	12.5	11.8	10
	电弧电流(峰值)/kA	15.8	27.6	17.7	37.7	31.2	47.5
电流转移过程	间隙触发时刻/ms	2.3	2.3	2.6	3.3	2.3	11.8
	电流转移熄弧时间/ms	0.7	0.7	0.1	0.1	0.1	0.9



(a) 完整波形

(b) 电弧转移局部波形放大

图 7 典型油中电弧转移熄弧试验波形

Fig.7 Typical waveform of oil arc transfer and extinguished test

油中电流最大值为 27.6 kA，弧阻约为 700~1 000 Ω。间隙控制器在 0.3 ms 时检测到油中电流超过设定阈值，延时后 2.3 ms 发出间隙触发命令，间隙 0.1 ms 内

触发导通，因为间隙 SF_6 弧压<1 kV，气体弧阻<10 Ω，远低于油中弧阻。由于气体电弧与油中电弧呈并联分流关系，低弧阻支路分流更多，由于气体电弧的负阻抗特性，电流越大而阻抗越低，进一步地分得更多的油中电流，最终将全部油中电流转移，实现油中电弧熄灭。试验中，油中电弧在 3 ms 时熄灭，表明间隙在 0.7 ms 内成功转移熄灭油中电弧。

试验后开展了 63 kA(含直流分量后电流峰值 150 kA)/50 ms 通流试验，试验电流如图 8 所示。试验后间隙电极形状完整、表面光滑，电极背部、导电杆、防弧罩和上下法兰无电弧烧蚀，防弧罩内聚四氟桶内壁微微泛灰为高温热气体的轻微烘烤痕迹，如图 9、图 10 所示，初步验证间隙短路通流性能良好。

3.2　弧压特性分析

弧压受油隙和电流的双重影响，主要影响因素为油隙长度。不同油隙距离下的弧压如图 11 所示，在 250、450 和 650 mm 油隙距离下，单位长度弧压分别为 50.4、53.8 和 61.8 V/mm，对比参考文献[18]、[19]和[20]，12、35 和 110 mm 油隙中单位长度弧压分别约为 35、43 和 50 V/mm。可见在长油隙下，油中弧压与油隙并不呈理想的线性关系，而是随着油隙增长，单位长度弧压会略有增加。这是因为油中燃弧后会产生大量油气，油气被电弧高温加热后在油中形成高压气流，引起了油流扰动，将电弧扩散拉长。油隙越长、弧压越大，燃弧能量越高，气体量越多，电弧扩散范围越大，正反馈导致弧压更高，这与参考文献[24]中 Cassie 电弧模型中认为理想的电弧弧压与电弧长度成正比的结论并不矛盾。考虑到实际换流变中油箱尺寸显著大于试验中的模拟样机尺寸，燃弧过程中油流扰动会进一步将电弧拉长，实际工况下弧压会比试验中的更高，有利于间隙转移熄弧。

电流对弧压影响不大，图 12 对比 250 mm 油隙中不同电流下弧压，电弧电流 17.7~47.5 kA 所对应的弧压为 12.6~11.8 kV，表明在 10~50 kA 短路电流范围内，长油隙中弧压受电流影响较小，其理论原因尚需开展大量试验，并辅助电弧形态观测等手段进行深入研究。本次试验重点在于分析工程适用性，目前的结果可覆盖换流变接地故障下燃弧工况。后续理论研究待进一步开展工作。

3.3　间隙转移熄弧性能分析

6 次试验中间隙均在 1 ms 内转移熄灭油中故障电弧，尤其是在最严苛的 250 mm 油隙下，不同试验电流和不同燃弧时间下均转移成功。试验中获得结论为：相同电流下气体电弧弧压为油中电弧弧压

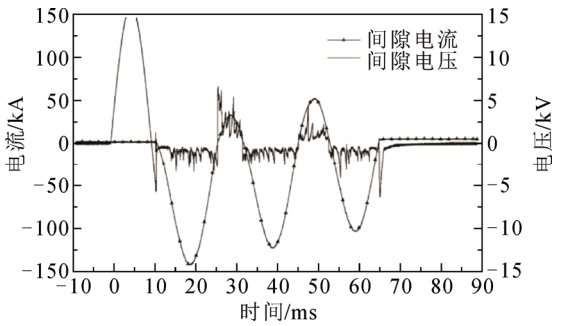


图 8　触发间隙通流试验波形

Fig.8　Waveform of triggered gap short circuit current test



图 9　试验后间隙电极

Fig.9　Gap electrodes after short circuit current test



图 10　试验后电极导电杆和防弧罩未见烧蚀痕迹

Fig.10　After short circuit current test, no signs of erosion were found on the electrode conductive rod and arc guard

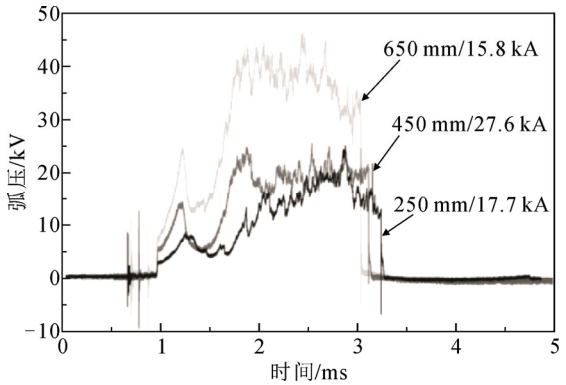


图 11　不同油隙下弧压

Fig.11　Arc voltages under different oil gaps

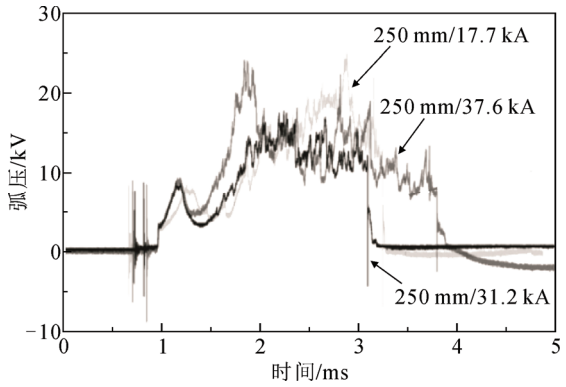


图 12 250 mm 油隙下不同电流弧压

Fig.12 Arc voltage of different currents under 250 mm oil gap

的 1/10~1/100，呈衰减方波，其规律与文献[25]中一致，通过对比弧压可知气体电弧弧阻远小于油中电弧弧阻。目前特高压换流变 550 kV 网侧的主绝缘最小油隙为 260 mm、油中短路电流为 10~40 kA，试验验证起始平均弧压>10 kV，相比间隙最低可靠转移熄弧电压 6 kV 而言有足够的裕度，充分表明通过间隙转移换流变油中故障电弧的防爆燃有效性。

4 结论

1）提出了在换流变发生内部严重短路故障时，通过接地触发间隙转移熄灭故障电弧的防爆燃方案。防爆燃间隙在换流变网侧对地安装、换流变内部短路故障时，在极低油中弧压下，可在 1 ms 内转移熄灭故障电流。

2）开展了油中电弧转移熄弧试验，等效模拟了实际换流变网侧绕组最小油隙放电燃弧的严重故障工况。在 6 次中不同参数试验中，间隙均在接到触发命令后 0.1 ms 内触发导通，0.1~0.9 ms 后完成油中电弧转移熄弧。表明即使特高压换流变 550 kV 网侧最小油隙短路，间隙也能够可靠转移熄弧。论证了长间隙、大短路电流下间隙转移熄弧防爆燃能力。

3）油中弧压与油隙距离并非呈理想的线性关系，而是随着油隙距离增加，单位长度油隙弧压略有增大。这是由于高温高压油气导致的油流扰动，使电弧弧道被拉长，弧压增加。实际换流变中油箱更大，电弧运动范围更大、弧道拉长更多，相同油隙下弧压可能更高。

4）相同油隙距离下，弧压随着电流变化不明显。在最短的 250 mm 油隙下，油中电流峰值为 17.7~37.7 kA 时，油中起始弧压为(12.2±0.4) kV，远高于间隙最低转移熄弧电压。

参考文献 References

[1] 钟建英，陈 刚，谭盛武，等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2769-2782.
ZHONG Jianying, CHEN Gang, TAN Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769-2782.

[2] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2353-2361.
HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2353-2361.

[3] LI X A, ZHANG N B, JIANG P, et al. A novel method of hybrid plasma injection driven by the pulsed discharge of a metal-polytetrafluoroethylene-stacked capillary in high-pressure SF_6[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(12): 124702.

[4] 颜湘莲，李志兵，田 阳，等. 大容量密封触发真空间隙设计与试验[J]. 高电压技术，2017，43(12)：3876-3883.
YAN Xianglian, LI Zhibing, TIAN Yang, et al. Design and test of seal triggering vacuum gap with large current capacity[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3876-3883.

[5] 杨兰均，马江波，黄 东，等. 高压合成回路用放电开关等离子体触发装置特性[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3474-3480.
YANG Lanjun, MA Jiangbo, HUANG Dong, et al. Characteristics of the plasma triggering device applied to discharge switch for HV synthetic circuit[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3474-3480.

[6] 黄 东，杨兰均，霍 鹏，等. 基于毛细管放电的大气压等离子体射流喷射装置放电特性[J]. 高电压技术，2016，42(12)：3769-3774.
HUANG Dong, YANG Lanjun, HUO Peng, et al. Discharge characteristics of atmospheric plasma flow ejector based on capillary discharge[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3769-3774.

[7] 刘善红，刘轩东，李志兵，等. 火花放电喷射等离子体触发气体开关导通特性及工作模式分析[J]. 高电压技术，2015，41(6)：1830-1836.
LIU Shanhong, LIU Xuandong, LI Zhibing, et al. Discharge characteristics and working modes of a gas switch ignited by spark-discharge ejected plasma[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1830-1836.

[8] 于晓蔓. 直流真空开关电弧磁场调控及新型触头设计[D]. 大连：大连理工大学，2019.
YU Xiaoman. The magnetic control of vacuum arc and design of a new contact for DC vacuum circuit breaker[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2019.

[9] 王永兴，曲学彬，王 雯，等. 旋弧式 SF_6/N_2 混合气体触发间隙开关电弧仿真与实验研究[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2111-2120.
WANG Yongxing, QU Xuebin, WANG Wen, et al. Simulation and experimental research on rotating arc of triggering gap switch in SF_6/N_2 mixed gas[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2111-2120.

[10] 李志兵，徐晓东，张 然，等. ±800 kV 混合直流输电工程用 DC 80 kV SF_6/N_2 等离子体喷射触发间隙研制[J]. 高电压技术，2023，49(3)：937-945.
LI Zhibing, XU Xiaodong, ZHANG Ran, et al. Development of DC 80 kV SF_6/N_2 plasma injection trigger gap for ±800 kV hybrid DC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 937-945.

[11] 郜 淦，李晓昂，张宁博，等. 增强型等离子体喷射装置及其触发极限[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3334-3343.
GAO Gan, LI Xiaoang, ZHANG Ningbo, et al. Enhanced plasma ejector and its trigger limit[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3334-3343.

[12] LI X A, GAO G, JIANG P, et al. An enhanced plasma injection method

for triggering a 10 cm-magnitude high-pressure SF_6 gas gap for a megavolt ultrafast bypass switch[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(10): 104701.

[13] LI X A, JIANG P, LI Z B, et al. Study on the properties of enhanced plasma injection driven by electrical explosion of aluminum wire in PTFE capillary in high-pressure SF_6[J]. Physics of Plasmas, 2023, 30(5): 053503.

[14] 李晓昂，张宁博，李志兵，等. 高气压 SF_6 中毛细管放电等离子体的喷射特性[J]. 高电压技术，2022，48(12)：5080-5089.
LI Xiaoang, ZHANG Ningbo, LI Zhibing, et al. Plasma injection characteristics driven by capillary discharge in high pressure SF_6[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5080-5089.

[15] 李晓昂，邵奕凯，李志兵，等. 特高压混合直流工程快速旁路保护用兆伏级 SF_6 间隙等离子体喷射触发特性及工程设计[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2614-2622.
LI Xiaoang, SHAO Yikai, LI Zhibing, et al. Triggering characteristics and engineering design of megavoltage-grade SF_6 gap plasmainjection for fast bypass protection in ultra-high voltage hybrid DC projects[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2614-2622.

[16] 周远翔，姜鑫鑫，陈维江，等. 交直流复合电压下变压器油中电弧放电及产气特性[J]. 高电压技术，2011，37(7)：1584-1589.
ZHOU Yuanxiang, JIANG Xinxin, CHEN Weijiang, et al. Arcing discharge and gas generation characteristics of transformer oil under combined AC and DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1584-1589.

[17] 李博宇，郝治国，李斯盟，等. 油浸式电力设备内部电弧引发的压力特征[J]. 高电压技术，2023，49(1)：198-206.
LI Boyu, HAO Zhiguo, LI Simeng, et al. Pressure characteristics of oil-immersed power equipment under internal arc[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 198-206.

[18] 潘志城，邓　军，彭　翔，等. 换流变压器真空分接开关油室燃弧试验研究[J]. 广东电力，2022，35(12)：76-83.
PAN Zhicheng, DENG Jun, PENG Xiang, et al. Research on arc test in oil chamber of vacuum on-load tap-changer for converter transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(12): 76-83.

[19] 李金忠，汪　可，任家帆，等. 分接开关油室电弧故障压力传播过程研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(20)：7651-7657.
LI Jinzhong, WANG Ke, REN Jiafan, et al. Study on pressure propagation process of arc fault in OLTC oil chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7651-7657.

[20] 刘泽洪，卢理成，周远翔，等. 变压器升高座区域电弧故障与压力特性研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(13)：4688-4697.
LIU Zehong, LU Licheng, ZHOU Yuanxiang, et al. Research on pressure characteristics of AC turret on arc fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4688-4697.

[21] 李龙女，张雅倩，李　岩，等. 带平衡绕组的分裂式变压器短路电流计算分析[J]. 电力系统及其自动化学报，2019，31(3)：69-75.
LI Longnü, ZHANG Yaqian, LI Yan, et al. Calculation and analysis of short-circuit current of split-winding transformer with stabilizing winding[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(3): 69-75.

[22] 何金良，张　波，曾　嵘，等. 1 000 kV 特高压变电站接地系统的设计[J]. 中国电机工程学报，2009，29(7)：7-12.
HE Jinliang, ZHANG Bo, ZENG Rong, et al. Grounding system design of 1 000 kV ultra-high voltage substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 7-12.

[23] 陈一鸣，梁　军，张静伟，等. 基于改进参数辨识的三绕组变压器绕组状态在线监测方法[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1567-1575.
CHEN Yiming, LIANG Jun, ZHANG Jingwei, et al. Method of online status monitoring for windings of three-winding transformer based on improved parameter identification[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1567-1575.

[24] 陈　俊，谢林涛，钟　杰，等. 重燃过电压下基于 Mayr-Cassie 模型的电弧仿真分析[J]. 智能电网，2013，3(4)：106-110.
CHEN Jun, XIE Lintao, ZHONG Jie, et al. Simulation of arc based on Mayr-Cassie model under restrike overvoltage[J]. Smart Grid, 2013, 3(4): 106-110.

[25] 李志兵，李晓昂，陈维江，等. SF_6 短间隙中高频电弧的阻抗特性[J]. 高电压技术，2013，39(6)：1411-1418.
LI Zhibing, LI Xiaoang, CHEN Weijiang, et al. Impedance characteristics of high-frequency arc in short SF_6 gap[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1411-1418.



李志兵
1975—，男，博士，教授级高工
主要从事高压电器、高电压试验技术、新型快速开关及其成套装置方面的研究工作
E-mail: lizb@ epri.sgcc.com.cn

LI Zhibing
Ph.D., Professor



张　然(通信作者)
1985—，女，博士，高工
主要从事脉冲功率计算、高电压与绝缘技术、触发间隙及其成套装置方面的研究工作
E-mail: zhangran_autumn@163.com

ZHANG Ran
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author

收稿日期　2023-12-15　修回日期　2024-08-27　　编辑　曾文君