

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.025

合成快速关合试验用有源触发装置的研究

吴 松, 罗时聪

(上海电气输配电试验中心, 上海 200072)

摘要: 以国际电工委员会(IEC)和中国关于高压断路器合成试验的相关标准为依据, 笔者提出了一种基于有源触发快速合成关合试验回路, 分析了试验过程, 解决了合成关合试验的技术难点, 介绍了三球双间隙点火均压回路结构特点, 充分体现其安全可靠和稳定的性能。有源触发回路具有快速及时、点火功率大和抗干扰能力强的特点, 对回路调试过程中碰到的技术问题归纳, 并提出解决方法, 回路建成后成功完成了多个电压等级的全电压关合试验, 给出短路额定参数 126 kV/40 kA 六氟化硫断路器的合成关合试验结果。

关键词: 三球双间隙; 有源触发; 合成关合; 合成回路; 关合装置

Research on Active Trigger Device for Synthetic Making Test

WU Song, LUO Shicong

(Shanghai Power Transmission & Distribution Testing Center, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on the synthetic making test principle from IEC and Chinese standards, a new fast making device with active circuit is introduced in this paper, including test process analysis and double trigger gaps feature technique. The device is reliable, safe and stable, also with fast response, high energy and anti-interference ability. In practice, many full voltage making tests covered different rated voltage have been completed including 126 kV/40 kA SF₆ circuit breaker making test.

Key words: the double-gap structure of the three-ball; active trigger; synthetic making; synthetic circuit; making device

0 引言

合成关合试验是对断路器短路关合性能进行验证的试验方法, 即在短路情况下断路器进行合闸操作过程中, 触头间的外施电压由独立的电压源提供, 短路电流则由降低电压的电流源提供, 在触头间隙击穿后, 借助快速关合装置将电流回路立即接到断路器上。

短路关合试验是 GB 1984—2003《高压交流断路器》及 GB/T 4473—2008《交流高压断路器》规定的必试项目之一^[1], 但 72.5 kV 及以上产品在实验室试验, 通常只能采用合成关合试验方法来验证。2009 年之前, 国内各大高压试验室均无此项试验能力。为实现标准要求完善检测能力, 必须研发出一种较为高效可靠的合成关合试验装置^[2]。

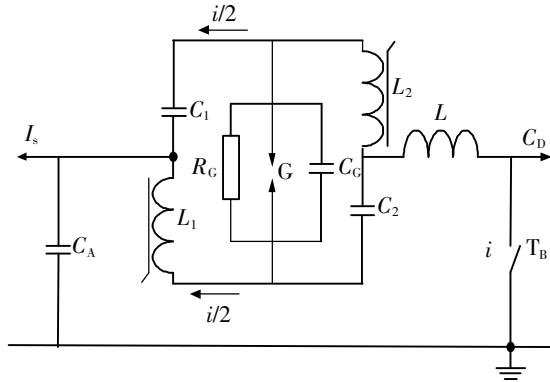
1 两种合成关合试验回路

国内外各试验站已有的关合回路和关合装置不尽相同, 主要有两种, 见图 1、2。

图 1 关合试验回路中的关合装置试验过程为: 充电装置向主电容 C_1 、 C_2 充电至电压 U_{CS} 等于关合电压, 当 T_B 合闸过程中, $C_1-L_2-T_B-C_A$ 回路及 $C_2-L_1-T_B-C_A$ 回路放电($C_1=C_2 \ll C_A$, $L_1=L_2$), 产生高频振荡放电频率, 间隙 G 两端出现近 2 倍充电电压 U_{CS} 造成放电间隙 G 贯穿, 球隙贯穿后, 电流源工频大电流 I 经 $L_1-G-L_2-T_B$ (高频振荡过程中 L_1 、 L_2 迅速饱和, 感抗趋近于零), 完成合成关合试验^[2]。

图 2 关合试验回路中的关合试验装置为国内自行研制, 动作原理如下: 被试断路器关合前, 充电电容器 C_S 、 C 充电完毕且 C_S 电压为预期关合电压, C 电压约为 1/2 预期关合电压。试品关合中发生预击

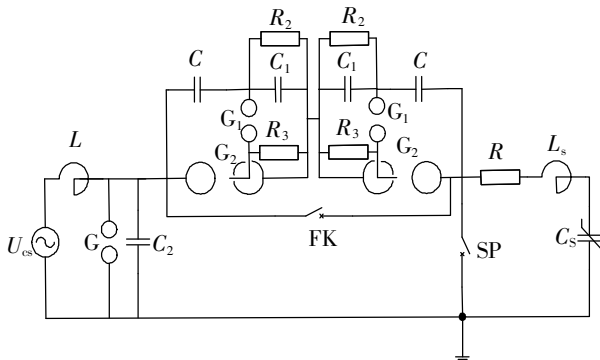
收稿日期: 2015-10-11; 修回日期: 2015-11-23



I_s —电流源; C_1, C_2 —主电容器; C_A —分压电容; C_D —充电装置; R_G, C_G —并联在放电间隙 G 上的电阻和电容; L_1, L_2 —非线性电抗器; T_B —被试断路器; L —连接被试回路的电抗器。

图1 快速关合装置回路1

Fig. 1 Fast making device circuit first



U_{cs} —电压源; DL —合闸开关; L —电流调节电感; $C, R_2, C_1, R_3, G_1, G_2$ —共同组成关合装置; R —限流电阻; FK —辅助断路器; C_s —主电容; G —电流源保护球; C_2 —分压电容; SP —试品; L_s —电压源调频电抗器。

图2 快速关合装置回路2

Fig. 2 Fast making device circuit second

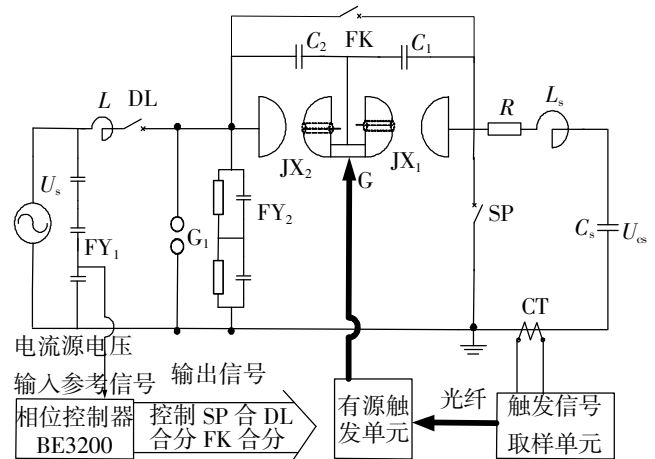
穿, 电容 C 通过 C_1 (由于放电频率 f_0 甚高 $1/(\omega_0 C_1) \ll R$)、 C_2 及试品与放电回路寄生电感 L_0 形成震荡放电, C_1 ($C_1 \ll C, C_2$) 两端电压急剧上升, 球隙 G_1 击穿, C 上电压施加在 G_2 的点火间隙击穿后, 对 G_2 形成强烈触发, 使 G_2 贯穿, 激发形成关合电流, 完成合成关合试验^[2]。

2 有源触发快速合成关合试验回路原理

文中提出的基于有源触发回路的合成关合回路, 见图3。图3中: U_s 是电流回路电压; U_{cs} 提供试验断路器所需要的外施电压; JX_1, JX_2, G 和并联在球隙间的电容 C_1 和 C_2 组成快速关合装置的一次部分。有源触发快速合成关合试验回路结构的一次部分区别于图2电路, 主要是使用三球双间隙进行电气绝缘隔离, 其优点在于体积小, 间隙上的电压分布趋于均匀, 放电稳定性好, 缩短了球隙的贯穿时间, 提高了试验的成功率。三球双间隙再并上均压电容 C_1 和 C_2 使其放电稳定性更高。 G_1 的主要作用

是保护电流源回路, 在发生间隙误触发时, 防止高电压对电流源回路设备绝缘的危害^[3]。

试品关合前, 双间隙关合装置两端电压为外施



U_s —电压源; DL —合闸开关; L —电流调节电感; C_1, C_2 —电容器; C_s —主电容; SP —试品; CT —电流互感器; L_s —主电抗器; FK —辅助断路器; FY_1, FY_2 —分压器; G —主球; G_1 —保护球; R —电阻; JX_1, JX_2 —主间隙。

图3 有源触发快速合成关合试验回路

Fig. 3 Fast making device circuit third

高电压 U_{cs} 与电流源电压 U_s 之差。要求合成关合试验与直接试验等价, 外施高压与短路电流之间的相位差与实际系统相同, 故此两电压应为同极性^[4]。该回路外施高压由电容器 C_s 预充电压 U_{cs} 提供, 为相位同步控制提供便利, 减少控制参量。

有源触发快速合成关合回路试验过程主要分两个环节: ①试品接到控制器发出的合闸命令后, 电流源电压峰值处发生预击穿^[5]; ②双间隙关合装置在试品预击穿发生后极短时间内贯通, 使电流回路的短路电流流过试品, 完成关合试验, 这一过程主要是通过有源触发部分完成。 CT 采样获得预击穿电流第一个半波, 经信号变换通过光纤传递给有源触发单元发出触发指令, 接到指令后有源触发单元将储存好的数百焦能量通过小间隙 (铜棒与石墨球体通过瓷管绝缘在球表面形成的间隙 G') 见图4。放电形成大量的自由离子, 在 C_1 和 C_2 两端的电压作用下迅速使主间隙贯穿, 大电流流过试品, 完成关合试验^[6]。

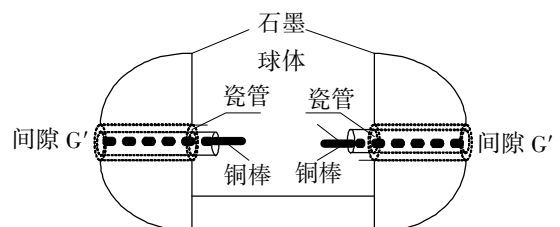


图4 球G结构图

Fig. 4 Ball G structure chart

3 有源触发回路结构和触发过程分析

合成关合试验成功与否的关键是试品发生预击穿后作用在试品断路器上的转换时间应限制在 $300\ \mu\text{s}$ 以内或者更短^[7]。文中提出有源触发回路能确保这一目标的实现。

有源触发回路框图见图 5, 试品接收到合闸指令后, 在外施高压击穿试品瞬间, 超瞬态关合电流 I_2 出现, CT 检测出电流信号送入触发信号采样单元, I_2 经采样单元转换成信号, 通过光纤传输有源触发单元入口, 令有源触发单元触发。存储于有源触发单元内的近 200 J 能量通过放电针与主球间的放电间隙释放, 并向主球隙注入大量带电粒子, 使主间隙击穿, 将电流源引入试品, 实现关合试验^[8]。

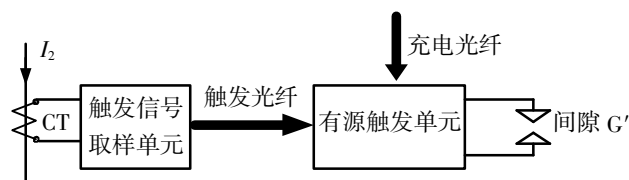
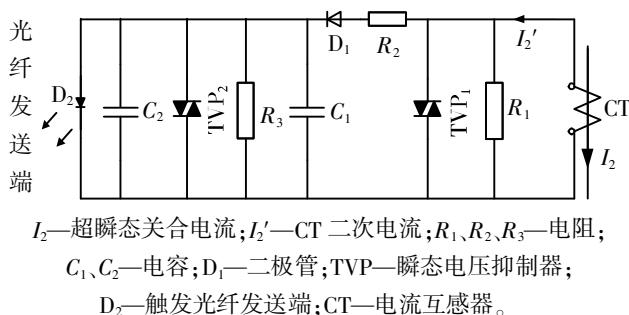


图 5 有源触发快速回路框图

Fig. 5 Block diagram of active trigger fast circuit

3.1 触发信号取样单元

触发信号取样单元见图 6, 试品发生预击穿时出现电流 I_2 , 电流互感器 CT(变比为 1 000/5)二次侧电流 I_2' , 电阻 R_2 与 R_3 支路获得部分电流提供给触发光纤接收端 D_2 , TVP₁ 瞬态电压抑制器防止 CT 二次侧出现过电压, TVP₂ 保护光纤发送端, 电容 C_1 和 C_2 起吸收滤波功能。触发光纤发送端 D_2 最大输入电流为 20 mA, 一般 5 mA 即可, 试验过程中测出图 6 中 C_2 两端的电压见图 7, 该回路能有效吸收电压回路 C_3 和有源触发单元主电容 C 在充电过程中出现的干扰信号, 提高回路的可靠性^[9-10]。



I_2 —超瞬态关合电流; I_2' —CT 二次电流; R_1 、 R_2 、 R_3 —电阻; C_1 、 C_2 —电容; D_1 —二极管; TVP—瞬态电压抑制器; D_2 —触发光纤发送端; CT—电流互感器。

图 6 触发信号取样单元原理图

Fig. 6 Schematic diagram of trigger signal sampling unit

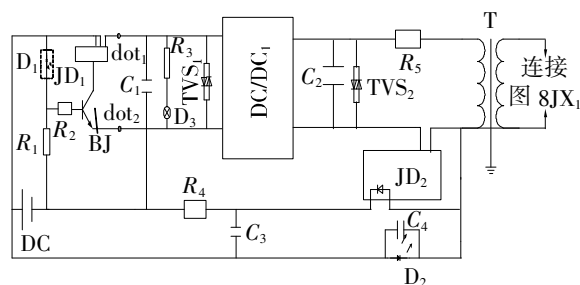


图 7 C_2 两端电压

Fig. 7 Voltage of C_2

3.2 有源触发单元

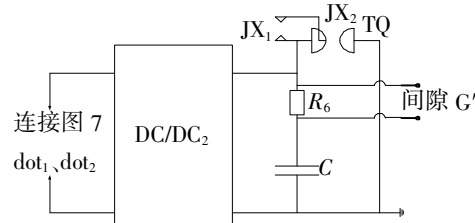
决定有源触发快速合成关合试验成功与否的关键在于有源触发单元动作是否迅速可靠以及通过主间隙释放的能量。有源触发单元可分为低压部分和高压部分, 见图 8、9。脉冲变压器 T 变比为 400 V/10 kV 最高频响 1 MHz; JD_2 为固态继电器, 其控制电压 12 V, 输出端最高耐压 500 V; DC 为直流蓄电池, 额定电压 12 V; 主电容 C 为 $4\ \mu\text{F}/10\ \text{kV}$ ^[11-12]。



TVP₁、TVP₂—稳压管; BJ—三极管; T—脉冲变压器; JD_1 —机械继电器; DC/DC₁—直流变换模块; dot₁、dot₂—与图 8 的连接点; R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 —电阻; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 —电容; D_3 —发光二极管; D_2 —触发光纤接收端; DC—直流蓄电池; JD_2 —固态继电器; D_1 —充电光纤接收端。

图 8 有源触发单元低压部分原理图

Fig. 8 Schematic diagram for low voltage of trigger signal sampling unit



DC/DC₂—直流变换模块; 间隙 G' — G_2 球表面间隙; JX_2 —铜球间隔; R_6 —电阻; C —主电容; JX_1 —铜球点火针与球体之间间隔; TQ—铜球。

图 9 触发信号取样单元高压部分原理图

Fig. 9 Schematic diagram for high voltage of trigger signal sampling unit

试验前, 电容 C_2 和主电容 C 需存储能量, 两个充电过程如下:

1) 控制室发出充电信号, 充电光纤接收端 D_1 导通, 三极管 BJ 导通致使机械继电器 JD_1 的常开节点闭合, 工作指示灯发光二极管 D_3 亮, 12 V 直流电源 DC 加在直流变换模块 DC/DC₁(12 V/400 V) 的输入端, 输出 400 V 给电容 C_2 充电。

2) 继电器 JD_1 的常开节点闭合 12 V 直流电源 DC 加在 dot₁ 和 dot₂ 上, 直流变换模块 DC/DC₂(12 V/10 kV) 工作, 主电容 C 充电。

有源触发单元控制回路分如下几个电路:

1) 固态继电器 JD_2 输出端与电容 C_2 、电阻 R_5 和变压器 T 的低压侧串联构成低压放电回路。

2) 固态继电器 JD_2 控制端、直流电源 DC 、电阻 R_4 和触发光纤接收端 D_2 串联构成放电回路控制回路。

3) 主电容 C 、高压电阻 R_6 和铜球 TQ 串联构成高压放电回路。

试验时, 试品预击穿图 6 中触发光纤发送端 D_2 发送信号至图 8 触发光纤接收端。导通后, C_3 端电压加在固态继电器 JD_2 控制端, JD_2 输出端导通。电容 C_2 经 R_5 向脉冲变压器 T 放电, 高压侧出现高压, 铜球点火, 间隙 JX_1 击穿, 铜球间隔 JX_2 处出现大量自由电子, 主电容 C 端高压将间隔 JX_2 击穿。随即电阻 R_6 与 C 并联, 高压将间隔 G' 击穿, G_2 两侧形成大量的自由离子, 经 C_1 、 C_2 两端电压作用, 快速击穿 G_1 与 G_2 之间, G_2 与 G_3 之间的间隙, 大电流流过试品, 完成关合试验。

4 回路调试过程与参数分析

有源触发快速合成关合试验回路要求各环节性能稳定、精准和快速, 参数匹配紧密。历时两年, 试验超百次, 稳态和瞬态试验过程分析结果归纳如下:

1) R 、 C 和 L 参数匹配(图 3), 避免出现谐振, 引起过电压, 电流变化率 di/dt 越大采样响应时间越短, 一般取放电电流频率 1 kHz 左右。

2) 试验证明:(图 3)在主间隙两端的并联电容 C_1 和 C_2 能提高稳定性, 去除电容常出现误触发或球隙不能有效贯穿现象, 电容 C_1 和 C_2 起均匀电场的功能, 确保两球隙间的电压分布均匀^[13]。

3) 间隔 G' 处释放能量大小直接决定主间隙能否有效击穿, 进而影响合成关合试验是否成功。经过大量试验证明: 72.5 kV 及以下电压等级采用一触发单元近 200 J 能量可确保主间隙有效贯穿, 126、145 kV 电压等级需采样两触发单元近 400 J 能量可确保主间隙有效贯穿。

4) 电压回路主电容 C_s 充电时, 电压充至某一高压时, 常出现触发单元误触发现象。由图 3 分析, 试品断口间偶尔会出现高频非自持性放电, CT 二次侧耦合出高频脉冲, 耦合至触发光纤引起触发单元误动。触发光纤发送端(图 6)并联 1 000 pF 电容 C_2 可消除误触发消除。

综上, 合理设计试验回路参数, 能确保试验结果符合标准要求。

5 合成关合试验的实施

根据 GB 1984—2003《高压交流断路器》为了对

断路器短路关合能力进行适当和全面的考核列出了两种极端情况: 即零点处和外施电压峰值关合。因此试验可分两次操作完成: ①合闸操作在电压波的零点, 出现最短预燃弧甚至不燃弧, 产生最大的非对称短路关合电流; ②合闸操作在规定的电压峰值进行, 产生对称短路电流, 具有最大的预燃弧时间。试验①可在降低的电压下进行直接试验, 试验②由于容量限制需要进行合成关合试验^[14]。

文中提及的有源触发回路能确保关合装置时延 t_m 小于 300 μs , 同时通过程序控制器 BE3200 进行试验②时, 能确保关合电压达到要求值, 被试开关在电流过零处完成关合试验。

电流源回路为网络电源, 电压源为振荡回路(图 3), 外施电压为直流电压, 外施电压值固定相当于将外施电压固定在某一相位上, 相位随预充电压值 U_{cs} 变化, 因此利用振荡回路作为电压回路将减少控制参量, 提高试验成功率^[15-16]。

试验获取大量的数据和图形, 结果归纳如下:

1) 试验回路按要求设置, 试品发生预击穿后, 对称的电流源电流立即流过试品, 等价于直接试验条件, 完成短路关合试验, 验证了回路原理上的正确性^[17-18]。

2) 进行近 20 次 145 kV/40 kA 失步 2 操作方式(失步短路电流 10 kA)试验, 调试出现一次误触发现象图 10。图 10 中: I_2 为电压电流; U_s 为电流源系统电压; I 为电流源电流; U_{FY2} 为电流源限流电抗器后端电压; U_{cs} 为电压源电压; U_{spc} 为试品合闸信号(下文中出现参数与此参数相同)。预击穿电压为外施电压峰值的 91.8% (U_{cs} 值为 217.3 kV, 预击穿相位 66.7°), 电流源相位 23°, 关合装置时延 t_m 等于 90 μs 。原因为主球距 d 裕度不够, 调节球距, 回路工作稳定^[19-20]。

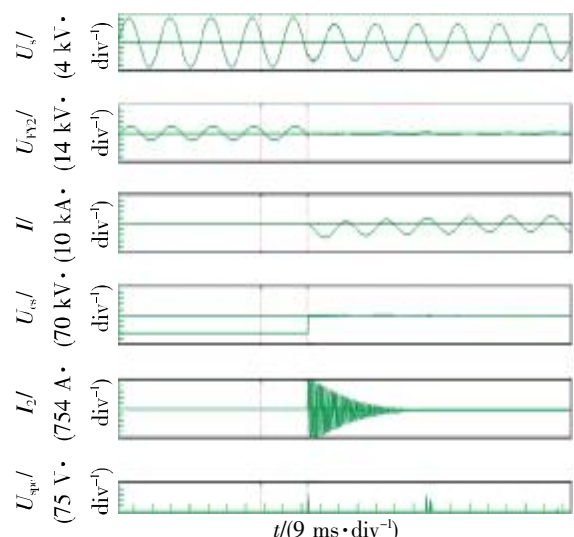


图 10 145 kV/40 kA 断路器 OP_2 试验误触发电压波形

Fig. 10 Oscillogram of error trigger about OP_2 test type for 145 kV/40 kA circuit breaker

3)主球电气特性稳定,断路器额定电压为 145 kV 失步电压下,球距为 65、70、75 mm 各进行五次合成关合试验,关合装置时延 t_m 平均值分别为 60、90、110 μs ,该关合装置具有较好的适用性。

4)此关合试验回路建成后,分别对额定电压为 24、40.5、72.5、126、145 kV,额定短路开断电流 40 kA 及以下断路器进行过 T100s 与 OP₂ 的合成关合试验,成功率保持在 85%以上。

5)关合试验过程中发现,由于试品固有合闸时间和预击穿时间的分散性,即使程控器向其发出精确的合闸命令,其预击穿相位仍会在一定的范围内变化,出现预击穿不发生电流源电压峰值处。

126 kV/40 kA 六氟化硫断路器 T100s 与 OP₂ 的合成关合试验见图 11、12。

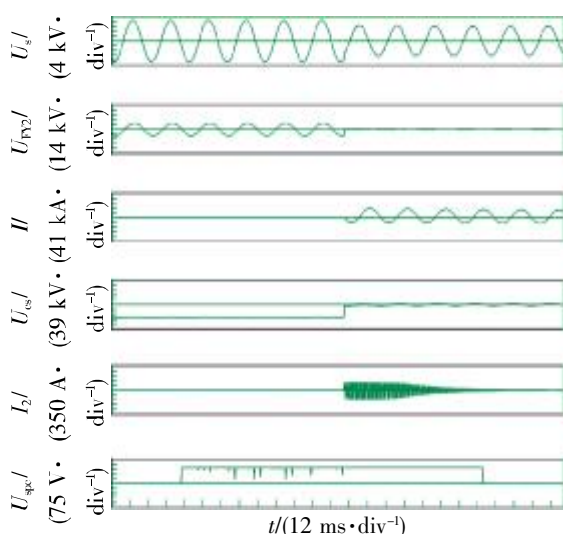


图 11 126 kV/40 kA 六氟化硫断路器 T100s 试验示波图

Fig. 11 Oscillogram about

T100s test type for 126 kV/40 kA SF₆ circuit breaker

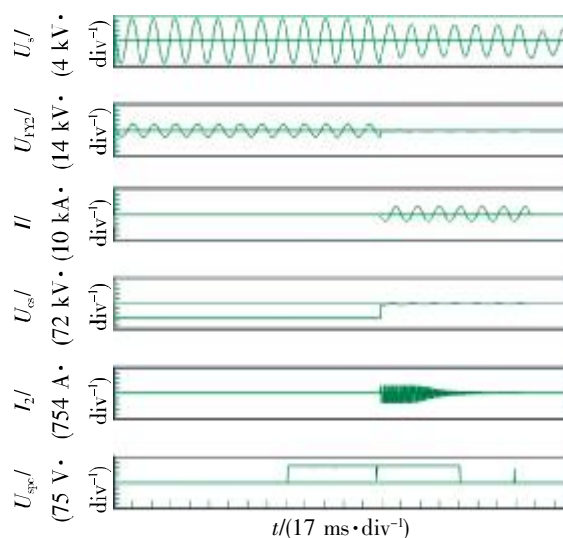


图 12 126 kV/40 kA 六氟化硫断路器 OP₂ 试验示波图

Fig. 12 Oscillogram about

OP₂ test type for 126 kV/40 kA SF₆ circuit breaker

6 结语

文中提出的基于有源触发回路的合成关合回路较快速关合装置回路一(图 1)和快速关合装置回路一(图 2)有如下特点:

- 1)自主研制,具备动作迅速,性能稳定的特性;
- 2)成本低,费用约为 30 万元,远低于同类产品;
- 3)该回路与同类设备相比,有较简单的一次回路结构,电路过程清晰明了。

总之,基于有源触发回路的合成关合回路是进行合成试验的又一种较好的试验方法,具有成本较低、运行方便、成功率高、技术简洁明了;二次回路通过模块化采样触发,动作迅速、性能稳定、点火能量大小可控,试验过程中便于分析改正;一次回路采用三球双间隙,有利于球隙的触发贯穿;利用均压电容,间隙电压稳定可靠,有效地提高了电场均匀度,根据电压等级高低,球距大小方便可调。该课题的完成,在技术上已为更高参数的合成关合试验(126 kV 失步关合试验电压值与 252 kV 试验方式 T100s 关合试验电压相等)做了准备工作。

参考文献:

- [1] 中国国家标准委员会. GB/T 4473—2008 交流高压断路器的合成试验[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
Chinese National Standardization Committee. GB/T 4473—2008 Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers[S]. Beijing:China Standard Press, 2008.
- [2] 孙梅,李刚,姚斯立,等.高压交流断路器的全电压关合试验[J]. 高压开关行业通讯,2010,12(1):19-21.
SUN Mei, LI Gang, YAO Sili, et al. Full-voltage synthetic making test for high voltage switches[J]. High voltage switch industry communication, 2010, 12(1): 19-21.
- [3] 张仁豫. 高电压试验技术[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
ZHANG Renyu. High voltage test technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [4] 庄稼人,党晓鹰. 在最大预燃弧条件下进行关合试验的合成关合回路[J]. 高压电器,1992,28(3):14-20.
ZHUANG Jiaren, DANG Xiaoying. Synthetic making circuit under the condition of making test with maximum pre arcing[J]. High Voltage Apparatus, 1992, 28(3): 14-20.
- [5] 范兴明,张鑫,邹积岩. 高压开关全电压关合试验相关问题研究[J]. 高压电器,2009,45(2):18-21.
FAN Xingming, ZHANG Xin, ZOU Jiyan. Study of full-voltage synthetic making test for high voltage switches[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 18-21.

- [6] 邢建,罗时聪,范杰,等.基于快速关合装置的合成关合试验方法及研究[J].电气技术,2011,12(5):63-66.
XIN Jian,LUO Shicong,FAN Jie,et al. Study method and research based on fast synthetic making test[J]. Electrical Technology 2011,12(5):63-66.
- [7] 陈跃,范兴明,丛吉远,等.基于TVS的快速关合开关的电流转移分析[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2006,11(1):1-5.
CHEN Yue,FANG Xingming,CONG Jiyuan,et al.The analysis of current shift on fast making switch based on TVS[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College,2006,11(1): 1-5.
- [8] 王兆安,黄俊.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2000.
WANG Zhao'an,HUANG Jun. Power electronics technology[M]. Beijing: Publishing of machinery industry,2000.
- [9] 程汉湘,武小梅.电力电子技术[M].北京:科学出版社,2010.
CHENG Hanxiang,WU Xiaomei. Power electronics technology[M]. Beijing: Science Press,2010.
- [10] 何孟兵,李劲,姚宗干.高功率脉冲放电开关综述[J].高电压技术,2000,26(4):33-35.
HE Mengbing,LI Jin,YAO Zonggan,Overview of high power pulse discharge switch[J]. High Voltage Engineering,2000,26(4):33-35.
- [11] 刘易勇,姚斯立,冯建强,等.智能高压电器磁场及传导抗扰度屏蔽室的电磁环境电平研究[J].高压电器,2014,50(2):18-22.
LIU Yiyong,YAO Sili,FENG Jianqiang,et al. Research on EM ambient level of shielded room for magnetic field and conduct sensitivity aiming for intelligent HV appliances[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(2):18-22.
- [12] 高文,施胜丹,王小红,等.高压大功率双串联谐振多级电压式DC-DC变换器的研究[J].高压电器,2014,50(3):50-56.
GAO Wen,SHI Shengdan,WANG Xiaohong,et al. Research on a kind of multi level voltage DC-DC converter for high voltage and high power using dual series resonant net[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(3):50-56.
- [13] 陈跃.全电压合成关合试验快速关合开关的研究[D].大连:大连理工大学,2006.
CHEN Yue. Study of full-voltage fast synthetic making test[D]. Dalian:Dalian University of Technology Master thesis,2006.
- [14] 范兴明,邹积岩,董恩源.全电压关合试验的控制策略及其实现[J].电网技术,2005,29(7):8-13.
FAN Xingming,ZOU Jiyuan. DONG Enyuan. Study on control strategy and its implementation of full-voltage synthetic making test for high voltage switches[J]. Power Network Technology,2005,29(7):8-13.
- [15] 中国国家标准委员会.GB 1984—2003 高压交流断路器[S].北京:中国标准出版社,2003.
Chinese National Standardization Committee. GB/T 1984—2003 High-voltage alternating current circuit-breakers[S]. Beijing: China Standard Press,2003.
- [16] 陈轩怒,邹吉岩,何佳俊.大电流真空电弧的并联开断[J].高压电器,1997,23(4):29-32.
CHEN Xuannu,ZOU Jiyuan,HE Jiajun. Parallel breaking on large current vacuum arc[J]. High Voltage Apparatus,1997,23(4):29-32.
- [17] 陈轩怒,王泽文,邹吉岩,等.真空断路器并联开断过程的实验研究[J].高压电器,1998,34(5):33-37.
CHEN Xuannu,WANG Zewen,ZHOU Jiyuan,et al. Experimental study on parallel breaking of large current vacuum arc[J]. High Voltage Apparatus,1998,34(5):33-37.
- [18] 苏宇红,何健.交流高压断路器三相直接试验T100s和T100a的标准分析与讨论[J].高压电器,2014,50(3):125-132.
SU Yuhong,HE Jian. Analysis and discussion on the standard of three phase direct test T100s and T100a for high voltage AC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2014,(50)3:125-132.
- [19] 张浩,郑宇宏,王娜.同步关合控制技术的研究及工程应用[J].高压电器,2014,50(5):76-86.
ZHANG Hao,ZHENG Yuhong,WANG Na. Investigation into synchronized making control technology for circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(5):76-86.
- [20] 赵艺杰,负保记,郑飞,等.基于最小二乘法的永磁断路器同步关合控制的研究[J].高压电器,2014,50(5):61-64.
ZHAO Yijie,YUN Baoji,ZHENG Fei,et al. Research of the synchronous closing technology of circuit breaker with permanent magnetism actuator based on least-square [J]. High Voltage Apparatus,2014,50(5):61-64.
- 吴松(1978—),男,硕士研究生,工程师,研究方向为高压大容量开断技术。