

DOI: 10.7667/PSPC151520

# 一种基于直流输电换流阀阀控设备的触发测试系统

祁招, 杨会磊, 胡子健, 张中强, 田兰芳, 赵起超

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 为了解决传统阀控设备触发功能测试中存在的测试效率偏低及测试质量不足的问题, 引入自动化测试方法设计测试系统, 以避免繁琐的人工操作, 减少测试中的人为因素, 并保证测试案例的一致性。针对阀控触发性能难以判断及触发状态复现困难的问题, 采用算法对触发数据进行处理并输出统计图表, 以实现触发性能的可视化, 触发状态的快速复现及触发问题的准确定位。该系统有效地提高了阀控设备触发功能测试的效率, 为检验阀控系统的触发性能提供了可靠的依据。

**关键词:** 换流阀; 阀控设备; 特高压直流输电; 触发脉冲; 自动化测试

## Design of automatic test system for triggering function of HVDC valve control equipment

QI Zhao, YANG Huilei, HU Zijian, ZHANG Zhongqiang, TIAN Lanfang, ZHAO Qichao

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low efficiency in the traditional trigger function test and improve the test quality, the test system based on automatic test strategy is established to avoid cumbersome manual operation, reduce artificial factors in the test and ensure the consistency of test cases. Because the trigger performance is difficult to judge and the reproduction of trigger state is hard, the algorithm is used to process the trigger data and output the chart, which realizes the visualization of trigger performance, rapid retrieval of trigger state and accurate positioning of the trigger problem. This system can effectively improve the efficiency of the trigger function test, which provides a reliable basis for the trigger performance of valve control system.

**Key words:** converter valve; valve control equipment; UHVDC; trigger plus; automatic test

## 0 引言

特高压直流输电具有传输距离远、容量大和损耗低等诸多优势<sup>[1]</sup>。近年来, 我国建设了多个特高压直流输电工程。换流阀是直流输电工程的核心装置, 而用于控制、监视和保护换流阀的阀控设备在整个直流输电工程中也是处于非常核心的位置<sup>[2]</sup>。

溪洛渡-浙江金华的±800 kV 特高压直流工程是金沙江溪洛渡、向家坝水电站送电华中、华东的3回±800 kV 特高压直流工程规划的重要组成部分<sup>[3]</sup>。本文以该直流输电工程为背景, 研究并分析了直流输电换流阀阀控设备的触发控制原理, 并针对其触发机制设计了一种自动化测试系统。

该系统能够模拟阀控系统的实际运行环境, 通过光纤实时采集阀控系统的运行数据和脉冲信息, 并对所采集到的脉冲数据进行算法分析。其算法主要实现对触发脉冲正确性, 稳定性及一致性三项重

要技术指标的运算分析, 且系统将依据分析结果自动生成可视化测试报表。

## 1 阀控触发脉冲

阀控系统 是换流阀与其他控制保护系统间的接口设备, 主要用于实现对晶闸管阀的触发和监测, 其中脉冲触发功能是阀控系统的核心功能<sup>[4]</sup>。在特高压直流输电工程的实际应用中对于换流阀晶闸管的导通时序以及导通瞬时电压和瞬时电流有严格要求, 为了达到工程要求就必须依靠阀控设备的触发控制功能来实现<sup>[5]</sup>。

换流阀阀控设备触发脉冲产生的原理: 换流阀上 TCE 板实时监测晶闸管两端的正向电压, 当正向电压达到整定的导通值时, TCE 板通过光纤向阀控系统发出正向电压建立脉冲信号 IP<sup>[6]</sup>。阀控系统对晶闸管正向电压建立信号 IP 以及极控系统发来的点火脉冲信号 CP(采集同步电压所得)进行处理, 根

据处理结果输出一定时序和脉宽的触发脉冲信号 FP<sup>[7]</sup>。触发脉冲信号 FP 通过光纤发送到换流阀上对应的晶闸管，从而触发晶闸管导通。

## 2 装置设计

触发脉冲测试装置是根据第 1 节中对触发脉冲原理的分析来设计的。该测试装置通过模拟正向电压 IP 信号和极控的 CP 信号，并经由光纤将这些控制信号传送至阀控系统，阀控系统则会依据这些信号的时序产生相应的触发脉冲 FP。如图 1 所示，该装置中设计有信号发送模块和数据采集模块。

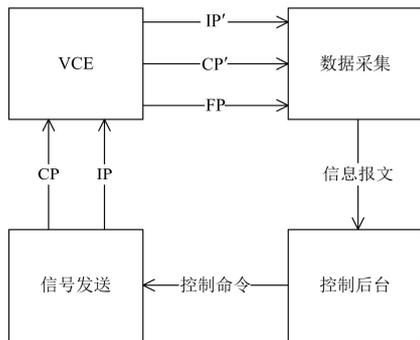


图 1 装置功能示意图  
Fig. 1 System function diagram

信号发送模块的作用是将后台发送的控制指令转换为正向电压建立信号 IP 和点火脉冲 CP 并通过光纤输出端口发送至阀控系统；数据采集模块的作用是通过光纤接收端口接收来自阀控系统的触发脉冲 FP，并提供哈丁端口对阀控设备内部接收到的正向电压建立信号 IP' 与点火脉冲 CP' 直接进行读取。

信号发送模块、数据采集模块与控制后台的信息交互通过 RS485 通信接口进行。数据报文通过十六进制编码的形式传输，并在报文中加入校验功能。

## 3 后台设计

系统控制后台的功能分为信号设置与数据采集，测试人员可以通过操作界面方便快捷地进行 IP 信号的脉宽与距离设置。后台中的信号设置功能界面如图 2 所示。

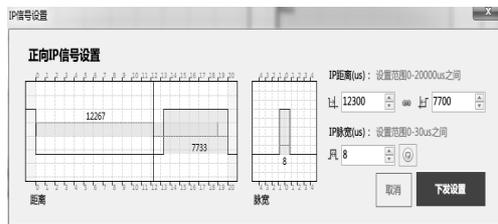


图 2 IP 信号设置界面  
Fig. 2 IP signal set interface

界面中的左侧动态显示了 IP 信号相对于 CP 信号的位置以及 IP 信号的脉宽。

后台通过数据采集模块上送的十六进制报文信息，换算出触发脉冲的脉宽以及相对于 CP 上升沿的距离，并通过图形绘制的方式在界面上方绘制出每一条报文对应的 FP 图形。后台监视界面采用色谱的方式绘制 FP 脉冲，在某一时刻出现的次数越多则颜色越深。

测试人员可以通过后台设置正向电压 IP 信号的脉宽、距离，以及点火脉冲 CP 信号上升沿的位置，并将其下发至信号发送模块。在控制后台的数据采集界面中设置触发脉冲信息的采集次数后，数据采集模块将自动采集阀控设备的触发脉冲信息，采集结束后会自动对所采集到的信息进行分析，并输出测试结果，从而实现自动化测试的目的。

## 4 试验数据分析

在换流阀阀控系统设计中，触发脉冲 FP 发送的位置是设定在距离点火脉冲 CP 信号上升沿 Y μs 处<sup>[8]</sup>。然而在实际应用中，由于软件和硬件等各种因素影响，触发脉冲 FP 的位置与系统设定值 Y 总是存在一定的偏差。我们需要对这些误差数据进行分析，判断阀控系统的实际触发误差是否在工程要求的误差范围内<sup>[9]</sup>。

为了得到可靠有效的误差分析结果，往往需要进行大量的重复实验以采集足够的试验数据作为分析样本<sup>[10]</sup>。

如果采用传统测试方法，将会消耗极大的人力和时间，试验数据也会由于人为因素出现误差。根据第 3 节中所述可知该测试系统可以实现自动化测试，有效节省人力物力，控制测试过程中产生的人为误差，并对所采集的试验数据从触发脉冲的正确性、稳定性及一致性三个技术指标来进行分析。

### 4.1 触发脉冲的正确性分析

触发脉冲的正确性指标要求触发脉冲的脉宽及发送位置应在系统设计要求的范围内。所有脉宽超差、位置超差的触发脉冲都应判定为不合格，并重点记录漏发、误发、多发脉冲的情况。脉冲数据采集界面如图 3 所示。

在图 3 中，界面下方罗列了所有测试过程中采集到的数据，测试人员通过后台可以设置脉宽的超差范围，一旦采集到的脉宽超出设定值，则会在报表中用红色标出，测试人员可以马上观察这个问题。而且本次数据采集结束后，后台软件会生成关于触发脉冲正确性的报告，报告的内容包括超差次数，超差的最大值，以及超差比率。

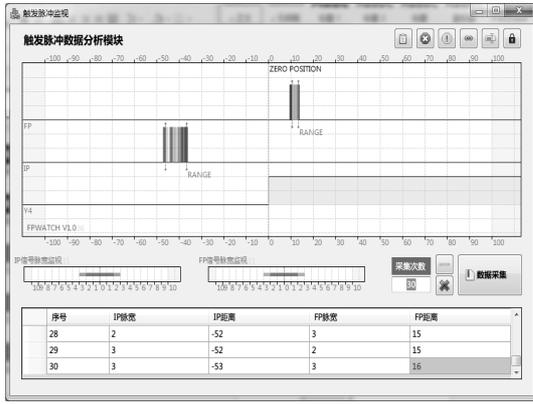


图3 触发脉冲数据采集界面

Fig. 3 Trigger pulse data acquisition interface

#### 4.2 触发脉冲的稳定性分析

在相同的触发条件下, 对触发通道进行重复触发, 通过分析脉冲位置与设定值的偏差程度, 来判断该触发通道的稳定性。

偏差程度由稳定因数来衡量, 采用概率统计换算出单个触发通道的稳定因数。

假设, 通过后台设定的触发次数为  $N$ , 从装置中读取到的触发脉冲 FP 距离 CP 上升沿的 FP 位置记为:  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 。其中,  $X_1$  出现的次数记为  $N_1$ ,  $X_2$  出现的次数记为  $N_2, \dots, X_n$  出现的次数记为  $N_n$ 。从而可以得出每个位置出现的概率, 记为  $P(X_i)$ , 则

$$P(X = X_i) = \frac{N_i}{N} \quad (1)$$

即可得到此次试验 FP 脉冲所处位置的均值, 记为

$$E(X) = \sum_{i=1}^n X_i \cdot P(X_i) \quad (2)$$

触发装置  $i$  发送触发脉冲的稳定值记为  $R_i$ , 则

$$R_i = \frac{(Y - E(x))}{Y} \quad (3)$$

考虑到阀控系统对于触发脉冲要求的特殊性,  $R_i$  不能完全真实地反映出触发通道稳定性, 以  $FP\_Ind$  标识触发通道的发送触发脉冲的稳定性和准确性综合指数。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n X_i^2 \cdot P(X_i) - E(x)^2 \quad (4)$$

假设设计规定, 若触发脉冲 FP 距离设定位置的误差范围在  $\gamma \mu s$  之内的合格。则

$$FP\_Ind = 1 - \frac{\varepsilon^2}{\gamma^2} \quad (5)$$

得出  $FP\_Ind$  之后, 即可根据其判断单个触发通道稳定性能的差别。

图4为某次试验采集到的试验数据, 采集次数为2000次。

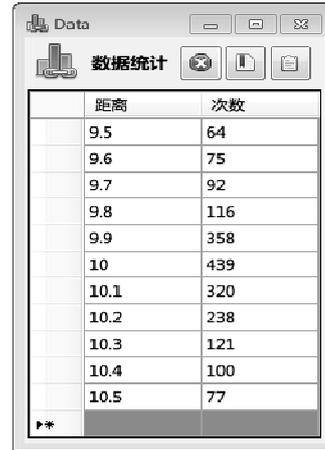


图4 装置采集的FP脉冲信息

Fig. 4 FP pulse information acquired

从图4的数据中可计算出如下结果:

$$P(X=9.5)=64/2000=0.032$$

$$P(X=9.6)=75/2000=0.0375$$

$$P(X=9.7)=92/2000=0.046$$

$$P(X=9.8)=116/2000=0.058$$

$$P(X=9.9)=358/2000=0.179$$

$$P(X=10)=439/2000=0.2195$$

$$P(X=10.1)=320/2000=0.16$$

$$P(X=10.2)=238/2000=0.119$$

$$P(X=10.3)=121/2000=0.0605$$

$$P(X=10.4)=100/2000=0.05$$

$$P(X=10.5)=77/2000=0.0385$$

$$\text{则 } E(X)=10.0229, \varepsilon=100.50968-100.45852441=0.05115559$$

$$FP\_Ind=1-0.05115559=0.94884441$$

稳定因数  $FP\_Ind$  反映了触发装置的稳定性, 其值越大表明该触发装置的性能越好。

除计算触发脉冲的稳定因数外, 后台软件还会根据采集到的数据绘制出相关图形, 如图5所示, 如果稳定性曲线在目标位置的峰值越尖锐, 则说明该触发通道越稳定。

#### 4.3 触发脉冲的一致性分析

触发脉冲的一致性要求单个阀段内所有触发通道在相同的触发条件下, 该阀段内的所有通道脉冲发送时刻应保持一致。

在实际的运行过程中, 同一个阀段的所有触发通道脉冲发送时间肯定存在一定的偏差, 因此就需要对触发脉冲的稳定性进行测量。

在该系统中, 可以同时单个阀段的4个触发

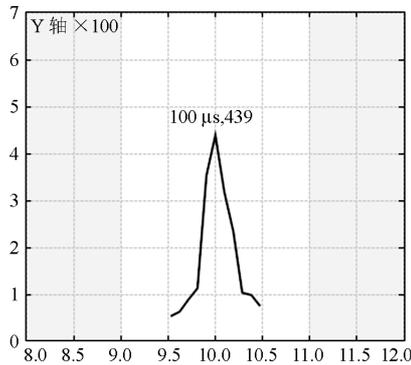


图 5 触发脉冲稳定性曲线  
Fig. 5 Stability curve of trigger pulse

通道进行监视，每一次数据采集都会对 4 个触发通道的触发脉冲时刻进行比对。

4 个触发通道的触发脉冲时刻信息会动态绘制在应用窗口中。应用窗口界面如图 6 所示。

在图 6 中以 U1 通道的位置时刻为参考零点，可以直观地观察出其他通道相对于 U1 通道的偏差情况。测试所得的最大差值 0.3 μs 小于实际工程中换流阀阀控系统所规定的单个阀段最大触发偏差，可以据此判断图 5 中触发通道的偏差是满足工程要求的<sup>[11]</sup>。

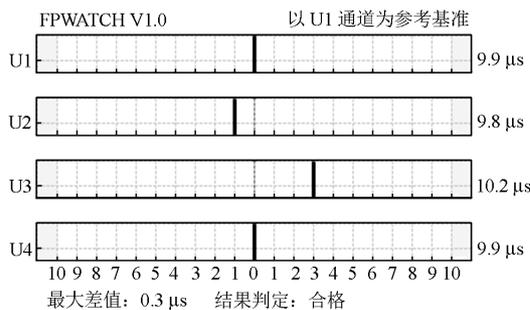


图 6 触发一致性测试界面  
Fig. 6 Trigger the conformance testing interface

## 5 总结

该触发脉冲测试系统具备脉冲收发，数据采集，脉冲分析，测试报告自动生成等多种功能，提供了丰富的测试设置选项以及可视化的脉冲数据分析界面，实现了测试过程自动化，并实际应用于溪浙工程±800 kV 特高压直流工程换流阀阀控系统的测试工作，能够有效地检验阀控系统的触发性能，显著地节省测试消耗的人力物力，并为以后特高压直流工程阀控触发检验技术的工程应用提供了参考依据。

## 参考文献

[1] 孙昕, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800 kV 特高压直流工程创新实践[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 35-45. SUN Xin, LIU Zehong, GAO Liying, et al. Practice and innovation in the ±800 kV UHVDC demonstration project[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(22): 35-45.

[2] 李晓华, 刘洋, 蔡泽祥. 直流输电换流变压器阀侧交流单相接地故障[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 38-45. LI Xiaohua, LIU Yang, CAI Zexiang. Analysis of grounding fault at HVDC converter transformer valve side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 38-45.

[3] 查鲲鹏, 刘远, 王高勇, 等. ±1100 kV 特高压换流阀直流耐压试验方法研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 87-93. ZHA Kunpeng, LIU Yuan, WANG Gaoyong, et al. Study of DC test method of 1100 kV UHVDC valve[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 87-93.

[4] 孙海峰, 崔翔, 齐磊, 等. 高压直流换流阀器件高频建模[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 142-148. SUN Haifeng, CUI Xiang, QI Lei, et al. High-frequency modeling of valve components in high voltage direct current converter stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 142-148.

[5] 张俊, 李跃婷. 直流输电工程换流阀控制系统对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 146-149. ZHANG Jun, LI Yueting. Relative analysis for valve control system in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 146-149.

[6] 潘亮亮. 高压直流输电系统阀控系统功能分析[J]. 电子制作, 2014(17): 29-30. PAN Liangliang. The analysis of HVDC valve control system functions[J]. Practical Electronics, 2014(17): 29-30.

[7] 宋建强, 黄永瑞, 孟学磊, 等. 特高压直流输电阀控动模试验系统设计[J]. 电力建设, 2015, 36(4): 64-69. SONG Jianqiang, HUANG Yongrui, MENG Xuelei, et al. System design of dynamic simulation test for valve equipment in UHVDC transmission project[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(4): 64-69.

[8] 雍巍伟. 晶闸管触发控制和多路实时检测系统的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007. YONG Weiwei. The study of thyristor trigger control and multi-channel real-time detection system[D]. Xi'an:

- Xidian University, 2007.
- [9] 岑正君, 程汉湘, 余韦彤, 等. 晶闸管触发的可靠性及其在磁控电抗器中应用研究[J]. 电测与仪表, 2014(20): 53-57.  
CEN Zhengjun, CHENG Hanxiang, YU Weitong, et al. The reliability study of the thyristor trigger and its application on the magnetic controlled reactor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014(20): 53-57.
- [10] 王忠, 张晓莉, 李忠安, 等. 继电保护装置自动测试系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 130-135.  
WANG Zhong, ZHANG Xiaoli, LI Zhongan, et al. Design of automatic test system for relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 130-135.
- [11] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江±800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.  
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ±800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- 
- 收稿日期: 2015-08-27; 修回日期: 2016-03-01
- 作者简介:
- 祁 招(1983-), 男, 通信作者, 学士, 助理工程师, 主要从事特高压直流输电换流阀阀控系统测试工作; E-mail: easymode@163.com
- 杨会磊(1986-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事特高压直流输电换流阀阀控系统测试工作; E-mail: xuchyh1@163.com
- 胡子健(1993-), 男, 本科, 学士, 助理工程师, 主要从事特高压直流换流阀阀控系统测试工作。E-mail: amoshzj1993@qq.com
- (编辑 周金梅)