

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.07.027

高压直流输电工程换相失败研究

陈 干, 田 方, 刘 宁, 刘 磊

(西安西电电力系统有限公司, 西安 710075)

摘要: 晶闸管换流阀在逆变工作模式时,对连接换流阀的交流系统、直流系统以及换流阀自身的状态要求比较严苛。当逆变侧出现换相失败时,换流阀会承受较大的电流应力,同时也会产生交流系统频率跌落、直流侧电流陡增等现象。韩国济州高压直流输电工程在调试过程中多次发生的换相失败现象,本文从换相失败发生机理出发,通过现场试验研究和模拟故障现象仿真等方法综合分析,确定出故障发生原因并有效解决了换相失败问题,满足工程运行要求。

关键词: 换流阀; 交流系统; 直流系统; 换相失败

Research on HVDC Transmission Project Commutation Failure

CHEN Gan, TIAN Fang, LIU Ning, LIU Lei

(Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: When a thyristor valve works in inverting mode, strict conditions are required for the AC and DC systems connecting with the valve, and for the state of the valve itself. When phase change failure happens in the inverting side, the valve will endure larger current stress, also frequency fluctuation of the AC system and current surge at DC side will occur. Commutation failure phenomenon has occurred many times in the debugging process of South Korea Jeju HVDC transmission project. This paper from the commutation failure theory, through comprehensive analysis of field test results and simulation of fault phenomena simulation methods, determine the fault point and effectively solve the commutation failure problem, satisfy the engineering operational requirements.

Key words: Thyristor valve; AC system; DC system; phase change failure

0 引言

韩国工程是中国首个海外直流工程,电压等级 ± 80 kV,输送功率 60 MW。该工程位于韩国西南的济州岛,包括金岳、翰林两个换流站和 8 km 长的直流输电线路,将济州岛西南海上的风力发电场生产的电能进行外送。

在单回路全功率系统运行试验中,当系统输送容量升到额定值并持续 7 min 后发生逆变失败故障,控制保护系统启动换相失败保护策略之后系统恢复正常运行,随后连续运行 1 h 的过程中,同样的故障随机出现了 6 次。故障发生时对系统产生较大冲击,直流侧瞬间产生约 2.6 倍的暂态过电流,交流系统频率变化范围为 59.7~60.3 Hz,谐波严重超标。

1 换相失败机理

换流阀导通时电压为零,阀阻断时承受正向和反向电压,见图 1。当阀内电流降到零以后在 γ 电角度加有反向电压,交流电压越过 C_0 点时结束,这个电压是阀关断所必须的。正常运行时在 γ 电角度内阀必须可靠地关断并完全恢复正向阻断能力,否则阀会继续导通或再次自行导通引起换相失败。对于特定的晶闸管元件来说,载流子复合建立 PN 结阻挡层的时间和元件的电气参数以及实际使用容量有关,通常按照晶闸管给出的反向恢复时间最大值作为工程设计依据^[1-10]。

触发超前角 β 过小、换流阀短路、丢失触发脉冲、逆变侧交流电压畸变等原因都能引起换相失败故障。以逆变侧阀 V_1 换相到阀 V_3 发生故障为例进行分析,正常情况下是阀 V_3 触发导通,阀 V_1 进而关断退出导

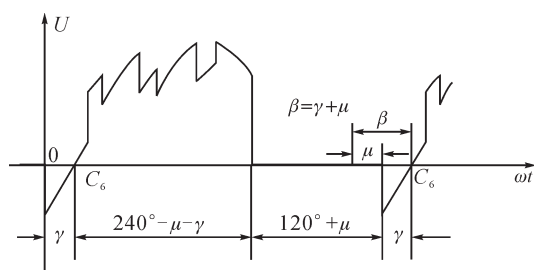


图1 逆变运行阀电压波形

Fig. 1 Inverter operating valve voltage

通,但是当阀 V_1 和阀 V_3 发生倒换相,或者在阀 V_3 触发时刻缺失触发脉冲阀 V_1 会继续导通下去,接着在阀 V_2 向阀 V_4 换相时刻,阀 V_4 被触发导通和阀 V_1 形成旁通对,造成直流侧短路。直到阀 V_4 和阀 V_6 换相后直流侧短路才结束,如果之后不发生换相失败,系统便可以恢复正常运行。故障过程中逆变器反电压下降过程历时 240° ,见表1。发生换相失败故障时逆变器在一段时间内直流反电压降低,直流电流增大^[11-17]。

2 试验中出现换相失败故障现象

2.1 换相失败故障现象及试验研究

韩国工程采用预测型熄弧角控制方式,在极 I

表1 V_1 阀换相到 V_3 阀导通次序
Table 1 The commutation conducting sequence of V_1 valve to V_3 valve

运行工况	导通次序						
正常换相	V_2	V_2	V_4	V_4	V_6	V_6	V_2
正常换相	V_1	V_3	V_3	V_5	V_5	V_1	V_1
换相失败	V_1	V_1	V_1	V_1	V_1	V_1	V_1

单极满负荷运行试验中,当输送功率提升到满负荷后 7 min 时,极保护系统发出换相失败报警,极控制随之启动保护策略系统即回复正常运行。该类换相失败故障随机反复出现,在满负荷运行 1 h 内共计发生换相失败 6 次。故障出现时在直流侧和交流侧出现较大的冲击,直流电流峰值高达 1 kA (见图 2 中 c 的波形图),超出晶闸管阀额定通流 378 A 的 2.6 倍,但未超出晶闸管的浪涌电流 6 kA,因此不会损坏晶闸管,与此同时监测到交流网的频率发生变化,范围 59.7~60.3 Hz。

为分析该换相失败的原因,保持系统连续运行的情况下改变输送功率,根据故障记录发生的情况,故障记录出现的频次见表 2。

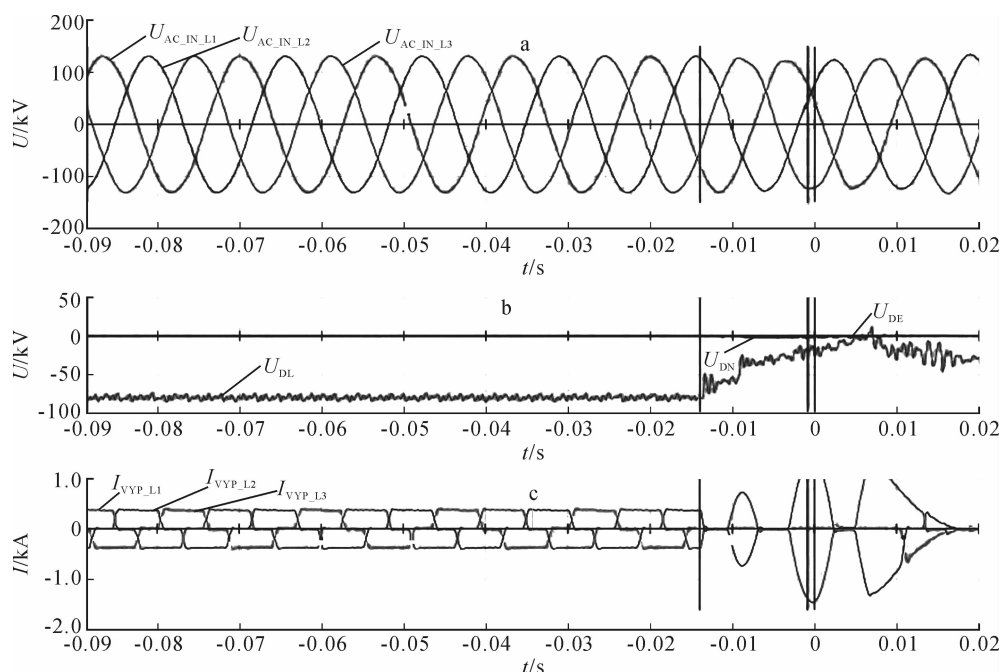


图2 换相失败 TFR 录波图

Fig. 2 Commutation failure TFR oscillograph

表2 故障次数统计

Table 2 Fault number statistics

传输功率	相关交流系统	故障次数	考核运行时间	发生单次故障的运行时间
30 MW(1.0 p.u.)	Y组 A、B 相	8	32 min23 s	4 min2.875 s
25 MW	Y组 A、B 相	2	2 min34 s	1 min17 s
15 MW	D组 A、B 相	1	1 min27 s	1 min27 s

2.2 换相失败故障分析

从图 2 的 TFR 录波图可以看出换相失败发生时对应的交流系统电压没有发生畸变、电压频率正常,而阀导通电流次序出错。表 2 的数据表明换相失败故障发生与系统输送功率出现故障的频次无关,没有因功率的变化而引起这种故障的增加或减少。试验中反复起停操作后对换流阀在内的相关一

次设备进行了检查试验,证明设备完好无损。可以判断,交流系统电压和频率跌宕等外因素可以排除,触发脉冲受干扰发生换流阀误触发或不触发是导致换相失败可能的原因。

发送到换流阀的触发点火信号的形成是一个比较复杂的过程,极控制系统的电网电压采集、同步锁相跟随、控制脉冲发生等功能单元产生阀控制信号,阀控制信号到换流阀的触发还必须经过一个重要设备阀底部电子设备柜(valve base electronic, VBE)。VBE是衔接换流阀和二次电气控保系统的桥梁,具有一二次设备电气隔离的重要作用,因而VBE到换流阀由触发和回报两类高压光缆连接,换流阀内设有高电位板TE负责与VBE接口,这些TE板随不同的晶闸管级处于不同高电位,属于一次电气设备。因此,从极控发出的触发脉冲,光—电信号的变换,以及信号通道传递中的任何一个环节的问题均可导致换相失败。

依据换流器工作的过程对故障电流波形进行分析,见图3。换流变阀侧电流 i_a 、 i_b 、 i_c 的正反向分别对应逆变换流器的 V_1 、 V_4 、 V_3 、 V_6 、 V_5 、 V_2 阀,正常换相过程中每阀导通 120° ,6脉动逆变器每 60° 会发生一次换相过程。可以看出在A点 V_2 阀开通失败而 V_4 阀开通, V_4 阀和 V_1 阀导通形成旁通对导致直流线路电流增加、电压下降。接着在B点 V_3 阀触发导通,由于逆变侧直流支撑电压下降 V_3 阀和 V_4 阀出现对称型过电流,此时 V_4 阀实际电流应该由直流侧旁路电流和交流换相电流两部分组成,因电流采样在变压器阀侧,所以只能看到交流部分的电流波形。由于逆变侧直流电压进一步下降,在 V_6 阀被触

发时 V_6 阀和 V_1 阀形成更大的对成型过电流,直至三周波后系统跳闸,见图2换相失败TFR录波图。

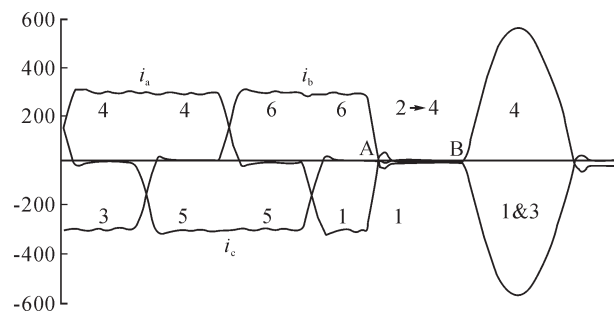


图3 换相失败故障波形分析图

Fig. 3 Commutation failure fault waveform analysis chart

3 因触发脉冲丢失造成换相失败故障现象的仿真分析

上述分析认为在运行过程中触发脉冲异常是造成换相失败的原因,可能存在一种原因: V_2 阀触发时刻误触发了 V_4 阀,而 V_2 阀未被触发,在PSCAD仿真环境下建模分析这种情况下阀电流波形,对比TFR故障录波图对换相失败的原因进一步分析研究。

3.1 V_2 阀未被触发

在 V_2 阀的触发时刻不触发 V_2 阀,得到的电流波形见图4。可以看出, V_2 阀失去触发导致了 V_6 阀到 V_2 阀换相失败, V_6 阀持续导通和 V_1 阀构成回路电流经过换流变BA相绕组,C相电压负半周 V_5 阀被触发与 V_6 阀形成换流,电流经过换流变BC相绕组。该波形和TFR录波存在差异, V_2 阀失去触发后 V_6 阀和 V_1 阀继续换流,见图3中A点。因此触发脉冲丢失不是故障发生的原因。

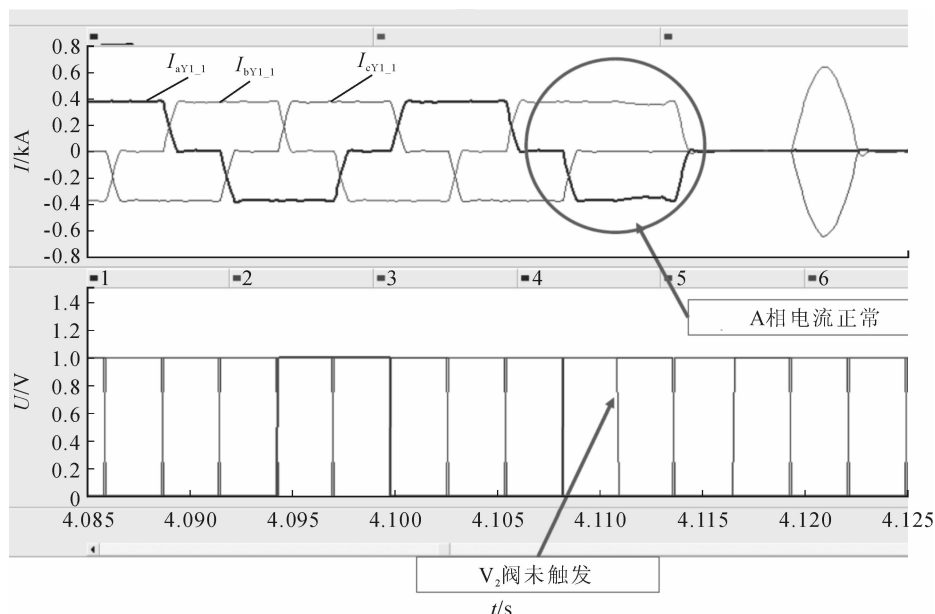


图4 V_2 阀未触发

Fig. 4 Valve V_2 missing firing

3.2 V_2 阀和 V_4 阀同时被触发

图 5 为 V_2 和 V_4 阀同时被触发。这种情况下仿真的结果分为两种,一种是在逆变运行状态下会产生和 TFR 录波完全相同的导通波形,另一种是在整流运行状态下换流阀却可以正常换相。换流阀整流运行时, V_2 阀触发时刻收到了触发脉冲,完成了 V_6 阀到 V_2 阀的正常换相过程,而此时 V_4 阀处于反电压状态,收到触发脉冲也不能导通,因此可以维持

正常的换相过程。换流阀逆变状态时,阀在 $240^\circ-\mu-\gamma$ 很长时间内处于正向电压。从换相波形分析可以看出在 V_2 阀触发时刻 V_4 阀也处于正向电压,且 V_4 阀靠近负母线电压, V_2 阀靠近正母线电压, V_2 阀和 V_4 阀同时被触发时只有 V_4 阀导通,造成换相失败。仿真表明 V_2 触发时刻失去触发,而 V_4 却被触发产生的波形也符合 TFR 录波波形,和图 5 的故障波形完全相同。

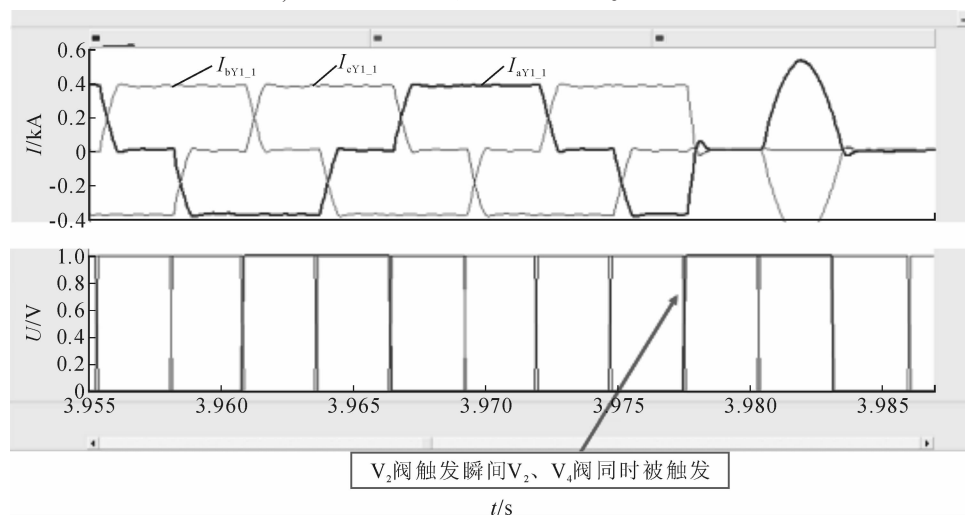


图 5 V_2 和 V_4 阀同时被触发

Fig. 5 V_2 and V_4 valve is triggered at the same time

现场调试中换相失败总是发生在逆变侧,反送情况下换相失败会发生在另一个站,而处于整流运行模式时运行是正常的。现场对触发信号相关屏柜的接线进行了仔细的检查,没有发现问题,结合上述仿真分析认为整个过程中不应发生 V_2 触发丢失的情况。唯一可能原因是 V_2 阀和 V_4 阀被同时触发,触发时刻是 V_2 阀正常换相点。

4 故障处理

工程现场极控制保护和交直流保护用的其他

屏柜都位于控制室内,控制室有温湿度控制装置,设备运行条件良好。阀底部电子设备柜 VBE 位于控制室外楼梯走道处,所处空间较大,加之人员出入门窗频繁打开,VBE 的运行相对较差,见图 6。VBE 和极控制接口柜的控制信号传输采用差分电信号形式,双绞屏蔽电缆长度大约 50 m。

用于换流阀触发的 12 路触发控制信号集中在一个多芯电缆内,每一个信号使用电缆里双绞的一对,这种传输方式在以往工程中有过使用。但是在对 VBE 屏柜输入触发控制信号的监测中发现, V_4

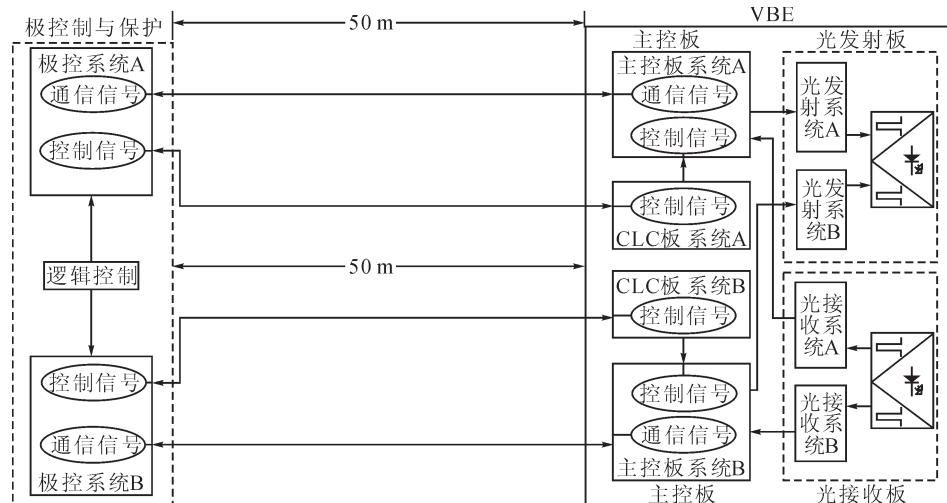


图 6 VBE 与极控之间的距离示意图

Fig. 6 Distance of VBE and pole control

阀触发脉冲在非触发时刻偶尔产生尖峰脉冲,严重情况下幅值达到10 V左右。根据VBE屏柜接口技术规范,触发控制输入信号抑制干扰电压水平不超过6 V。信号输入的接收参考电路见图7,6 V以下的信号会被串联的稳压管BZX84屏蔽而不能输入,前级的RC电路更加强了抗干扰的作用。显然这个尖峰信号幅值已经超过了这个数值,因此V₄阀会收到误触发信号。

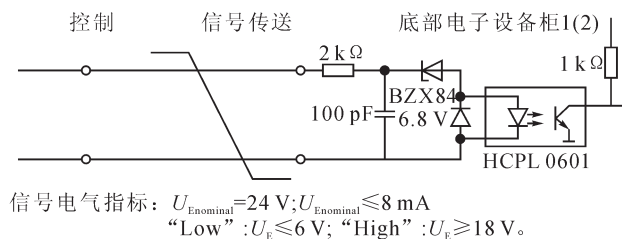


图7 VBE 触发控制信号输入技术要求

Fig. 7 VBE firing control signal technical requirements

最终在信号传输双绞电缆上找到了故障点,V₂触发信号和V₄触发信号混合接在了2组双绞屏蔽线里,在传输中产生耦合干扰。对两站全部进行消缺后,测试证明V₄触发信号的干扰脉冲消失,一次设备带电运行正常,再没有出现换相失败现象。

5 结论

基于换流阀逆变换相失败故障产生机理,结合现场试验数据采用建模仿真等方法分析解决工程问题,得到如下结论:

1)二次设备控制脉冲相互干扰误触发阀导通引起本次换相失败,对相应的信号传输电缆整改后问题得到解决。

2)直流输电系统中发生逆变换相失败的原因有多个方面,需要结合现场实际排查分析。文中通过此类工程问题的实例研究,对类似工程换流阀换相失败故障分析有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 浙江大学直流输电编写组. 直流输电[M]. 北京:中国电力出版社,1982.
- [2] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [4] 李侠, SACHS G, UDER M. $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流输电用6英寸大功率晶闸管换流阀[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 1-5.
- [5] 袁清云. HVDC换流阀及其触发与在线监测系统[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [6] 李侠, 陈干. 高压直流输电开路试验中换流阀设备保护的探讨[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 86-89.
- [7] 王英洁, 李斌, 田方. 高岭背靠背工程换流阀电气设计[J]. 电工文摘, 2012, 47(1): 18-21.
- [8] 田杰. 高压直流控制保护系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 10-14.
- [9] 乔治, 徐政. 电力系统谐波基本原理, 分析方法和滤波器设计[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [10] 张民, 贺仁睦, 孙哲, 等. 基于PSCAD/EMTDC的直流控制保护系统仿真平台及其在直流工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 112-117.
- [11] 黄华生, 黄蓉, 蔡梅凤. 误合电容器引起事故扩大的原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(4): 63-67.
- [12] 李强, 周敏刚, 陈楠, 等. 特高压直流换流阀单阀交流试验方法研究[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 1-4.
- [13] LI Qiang, ZHOU Mingang, CHEN Nan, et al. Study on AC voltage test method of UHVDC valve[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 1-5.
- [14] LI Xia, SACHS G, UDER M. 6 inch high power thyristor valves for $\pm 800\text{ kV}$ UHVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 1-5.
- [15] YUAN Qingyun. HVDC converter and its control monitor system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [16] LI Xia, CHEN Gan. Case study on converter valve protection in open-circuit test[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3): 86-89.
- [17] WANG Yingjie, LI Bin, TIAN Fang. Gaoling back to back project thyristor valve electrical design[J]. Electrician Abstracts, 2012, 47(1): 18-21.
- [18] TIAN Jie. Design and realization of HVDC control and protection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 10-14.
- [19] QIAO Zhi, XU Zheng. Power system harmonics fundamentals, analysis and filter design[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [20] ZHANG Min, HE Renmu, SUN Zhe, et al. The HVDC control and protection simulation platform based on PSCAD/EMTDC and its application in HVDC projects[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 112-117.
- [21] HUANG Huasheng, HUANG Rong, CAI Meifeng. Analysis on accident expansion by mal-closing capacitor bank [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(4): 63-67.
- [22] LI Qiang, ZHOU Mingang, CHEN Nan, et al. Study on AC voltage test method of UHVDC valve[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 1-5.

(下转第147页)

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.07.028

变压器套管局部放电的特征与识别

肖天为

(广州供电局有限公司, 广州 510410)

摘要: 变压器套管的局部放电是引起绝缘劣化, 导致套管着火和爆炸的重要原因, 现有的套管局部放电测量需要利用套管末屏的接地线, 操作复杂, 且容易受地网中的脉冲信号干扰。为了解决这个问题, 文中提出了一种基于特高频技术的变压器套管局部放电检测及模式识别方法。根据实际套管典型缺陷, 在实验室以 110 kV 变压器出线套管为试验对象, 制造了套管顶部悬浮、套管末屏引线接触不良、套管下部均压环悬浮模型、套管下瓷套沿面放电这 4 种缺陷模型。利用传统脉冲电流和特高频检测方法, 测量了局部放电特性, 对比分析了脉冲电流 PRPD、特高频 PRPD、NV 图谱的特征。研究表明: 套管缺陷局放特高频 PRPD 谱图与脉冲电流法所测结果基本一致; 根据 PRPD、NV 图谱的形态特征, 可以辨识出套管局部放电缺陷类型及可能的放电部位。文中的研究成果对推动套管局部放电带电检测有重要意义。

关键词: 套管; 局部放电; PRPD; 特高频; 模式识别

Partial Discharge Detection and Pattern Recognition for Transformer Bushings Based on UHF Technology

XIAO Tianwei

(Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510410, China)

Abstract: Partial discharge (PD) of transformer bushings causes degradation of the insulation, resulting in fire and explosion of the bushing. The conventional PD measurement method needs to use the grounding lines of bushing's end screen, making the operation complex, and the measurement is interfered by the pulse signal from grounding network. In order to solve this problem, this study proposed a partial discharge detection and pattern recognition method for the bushing based on ultra-high frequency technology. According to the typical defects in real bushings, four PD defect models were designed on a 110 kV transformer bushing. Then the PD signals of the four defect models were detected by the conventional pulse current method and the proposed UHF detection method, respectively. The results show that: 1) the PRPD spectrums of the PD defects obtained by the UHF detection method and the pulse current method are basically identical; and 2) the PD defect types and possible discharge position can be identified according to the morphological features of the PRPD and NV spectrums. This research may promote on-line PD detection of bushings.

Key words: bushings; partial discharge; PRPD; UHF; pattern recognition

0 引言

变压器出线套管缺陷主要有绝缘受潮、气泡或杂质、局部过热, 这些缺陷往往伴随出现局部放电现象。由于其结构紧凑, 运行及电磁环境恶劣, 局部放电发展迅猛, 有可能导致套管运行故障、变压器

停运等严重后果^[1-3]。根据德国汉诺威大学统计^[4], 套管导致的变压器事故次数约占变压器重大故障次数的 45%。中国从 2010 年开始近三年的 220 kV 及以上电压等级变压器的事故统计表明^[5-6], 套管故障导致的变压器非计划停运次数共 24 次, 共计 2 300 h。由此可见, 套管故障是造成变压器非计划停运的直接原因之一, 具有偶发性强、故障影响时间长的特点。鉴于此, 加强套管绝缘状态的检测和评估对于

提高电网安全可靠具有重大意义。

20世纪90年代开始,国内逐渐开始出现容性设备在线监测装置^[7]。这类装置借助于先进的电流传感器和数字化采样装置,同时测量容性设备的接地电流和电网电压,实现了在线检测介质损耗因数和主绝缘电容量,取得了较好的测量效果^[8]。容性设备检测方法适用于设备受潮、电容屏间短路等缺陷,对于局部放电检测灵敏度低^[9-10];此外该方法对安装工艺要求极高,在改造末屏时可能会引入安全隐患^[11]。综上所述,现有的套管绝缘检测方法不但不能及时、有效地发现局部放电缺陷,而且无法识别套管放电位置类型。

近年来有学者针对套管局部放电测量提出基于罗氏线圈原理^[12],采用磁耦合方式测量末屏接地线脉冲电流信号,检测回路与高压回路之间没有直接联系,提高了一定的安全性。但该方法缺点在于:①新式110 kV以上套管考虑到设备安全性,针对末屏接地的处理多数采用内置式或常接地方式^[13],避免从未屏直接引出地线;②即使少部分末屏引出接地的套管,由于运行现场干扰严重,导致脉冲电流法很难有效应用于在线监测^[14]。此外还有学者利用红外、紫外等方法对套管进行局放检测,该方法属于遥测方法,进一步提高了检测安全性,但目前该类方法并不能辨识套管缺陷类型^[15]。

特高频(ultra-high-frequency, UHF)法是近20年来发展起来的一种检测电力设备局放的新方法,该方法具有抗干扰能力强,灵敏度高特点,适用于设备的在线检测^[16]。此外特高频法可以远离带电设备,属于一种安全性较高的遥测方法。针对基于UHF法的局放模式识别,国内外已有众多学者将用局放相位分布、放电次数、幅值分布等参数作为特征量,来识别GIS、变压器等设备缺陷位置、类型、评估设备绝缘状态,取得了良好的效果^[17-18]。但国内外鲜有针对套管局放特高频检测的相关报道,更没有开展针对套管局放UHF信号的模式识别工作。

为此,笔者提出了一种基于特高频法的套管局部放电带电检测和缺陷类型识别方法。该方法采用非接触式遥测方式,进一步提高了套管在线监测的安全性。为了获得有效的套管局部放电特高频统计特征信息,实现套管特高频方法缺陷判别,文中结合常见套管缺陷类型制作了4种不同放电模型,建立了套管局放测试研究试验平台,对不同模型下的局放特高频信号进行了测量,得到了相应的PRPD散点图及NV柱状图,并对缺陷特征谱图进行了分析。

1 实验平台与检测系统

1.1 试验平台

为了详细研究套管典型缺陷局部放电特高频信号的相位特征,在华北电力大学高电压试验大厅根据试验原理图1,搭建了套管局部放电的试验平台,见图2。

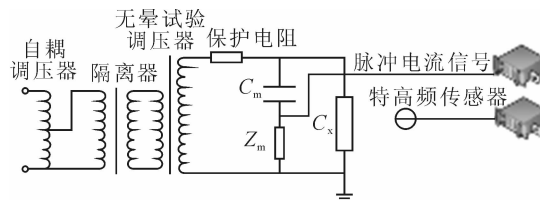


图1 套管局部放电试验原理图

Fig. 1 Experimental wiring diagram of PD location for bushing

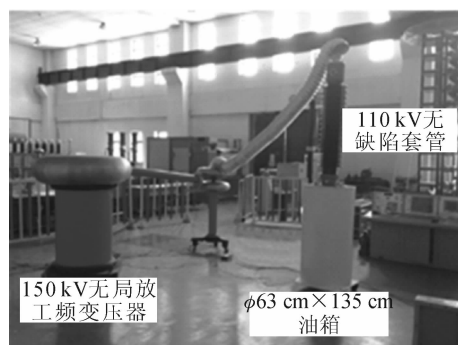


图2 套管局放检测平台实物图

Fig. 2 Arrangement of bushing in PD test

试验所用套管试品为湖南电力电瓷电器厂生产的BRDLW2-126/630-4型110 kV油纸电容式变压器出线套管。为了模拟实际工况,套管下部浸入变压器油油箱,油箱直径63 cm,高135 cm,变压器油型号为昆仑25号。套管露出油箱部分高210 cm,浸入油箱部分长85 cm。

1.2 检测系统

局部放电测量系统见图3,包括脉冲电流检测仪和特高频天线阵列检测系统。使用DOBLE公司的LDS-6型脉冲电流检测仪监视不同模型的局部放电电量特高频局放仪采用华北电力大学高压所自行开发研制的HD-IPD便携式局放仪,内置40 dB增益可调放大器。该设备内部已经集成采集、同步等功能,可以绘制PRPD、NV等图谱,并可以直接输出局放信息的统计信息。

1.3 典型缺陷设置

根据国家电网公司对变压器事故套管的解体研究^[19-20],油纸电容式变压器出线套管常见故障主要集中在套管的顶部、末屏、底端均压环及下瓷套



图3 局放检测系统实物图

Fig. 3 Arrangement of PD detection system

处。因此试验共设计以下4种局放模型:

1) 套管顶部接触不良放电模型。套管顶部因长期淋雨受潮, 容易出现锈蚀, 最终导致顶部金属部分连接处发生悬浮放电。将一段金属丝悬于套管顶部螺帽附近, 与套管顶部金属不直接相连, 二者保持约1 mm 的空气绝缘距离, 从而形成悬浮放电, 见图4。

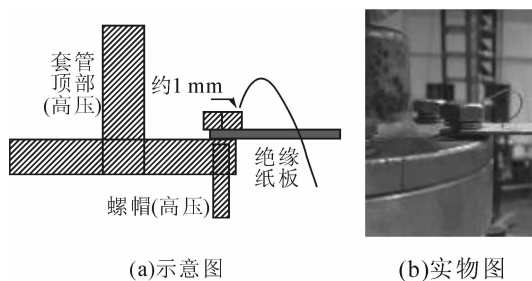


图4 套管悬浮缺陷模型

Fig. 4 Suspended discharge on bushing's top cap

2) 末屏引线接触不良模型。现场预试和在线监测装置会对末屏进行改动, 因此末屏处的接触不良放电是电容式套管最常见的故障; 试验时通过改造末屏防护罩, 设计防护罩中心用一颗活动顶丝和接线柱相接触。顶丝旋紧顶住接线柱时, 末屏处良好接地; 需要时, 将顶丝旋出0.5圈, 顶丝和接线柱分离, 即形成末屏处虚接, 见图5。

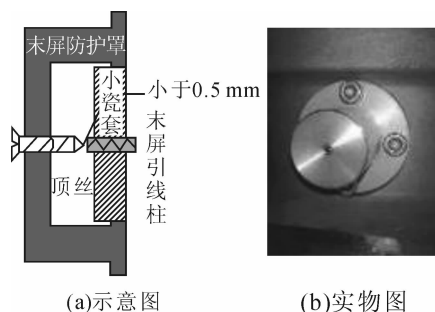


图5 套管末屏引线接触不良缺陷模型

Fig. 5 Bad connection in bushing tap

3) 套管下部均压环悬浮放电模型。导杆下部均压环会因长期变压器铁心而震动松脱, 容易产生悬浮放电。试验时用一小段绝缘绳将垫片绑在均压环上, 同时二者之间的距离小于2 mm。加压时, 由于

垫片距离均压环距离较近, 形成稳定的油中悬浮放电, 见图6。

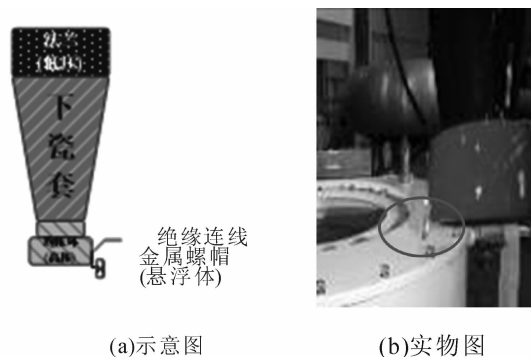


图6 套管下部均压环悬浮缺陷模型

Fig. 6 Surface discharge on the bottom of bushing

4) 瓷套沿面放电模型。实际变压器在运行中, 下瓷套和套管互感器之间会因种种原因积累脏污, 产生沿面放电。试验时用一根硬铝导线将下部均压环的高压引到接近地电位的法兰处, 导线末端削尖且正对法兰下端, 导线尖端距离法兰约5 cm, 由此形成导线末端的针尖与下瓷套表面的沿面放电, 见图7。

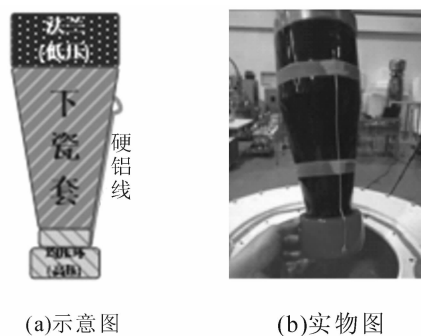


图7 套管下瓷套沿面缺陷模型

Fig. 7 Floating discharge on the bottom of bushing

1.4 试验方法

试验前在距离套管试验平台3.5 m处固定好传感器。试验时对套管施加工频电压, 使其产生稳定局部放电, 采用特高频检测系统接收电磁波信号。采用阶梯升压法: 每次提高电压2 kV, 保持5 min, 逐步提高施加电压直到脉冲电流局部放电仪能够检测到明显的局部放电, 此时电压即为局放起始电压; 随后升压保持时间改为20 min, 逐步提高施加电压直到局部放电量基本稳定, 此时将检测阻抗输出的电压信号与HD-IPD局放仪相位同步信号同时接入泰克2002示波器, 校验两者相位差, 便于实现局放仪的软件移相, 得到更加准确的相位特性。

2 局部放电特征分析

2.1 套管顶部悬浮模型

电压在26 kV左右, 放电稳定记录谱图, 视在

放电量约为 800 pC。此时脉冲电流谱图见图 8(a)。放电主要分布在 $30^\circ \sim 120^\circ$ 和 $210^\circ \sim 300^\circ$ 附近, 并且负半轴幅值大于正半轴, 在某些小区间内并未有放电信号, 整体谱图形状不连续, 两半轴呈“弧形锯齿状”。脉冲电流谱图基本符合空气中悬浮放电的特征, 放电幅值较高成悬浮状。特高频法所绘谱图见图 8(b)。放电主要分布在 $20^\circ \sim 110^\circ$ 和 $210^\circ \sim 300^\circ$ 相位之间, 并且负半轴幅值大于正半轴, 正半轴同脉冲电流谱图类似呈现“锯齿状”, 但负半轴略有不同, 幅值的分散性比较大, 导致呈现“塔状”, 且没有明显的“锯齿”特点。

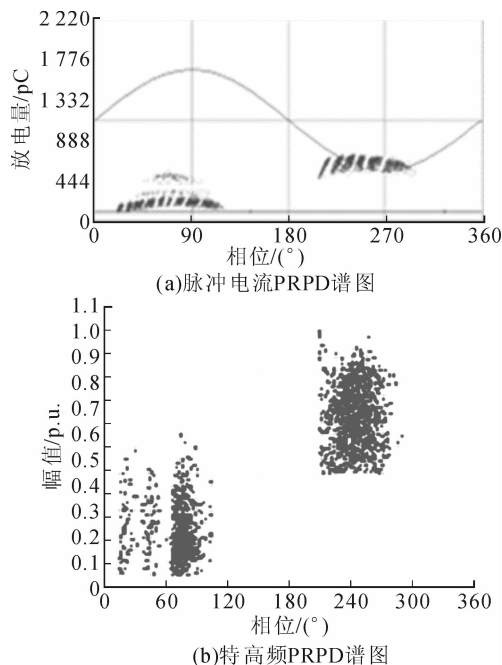


图8 套管顶部悬浮谱图对比

Fig. 8 Patterns of floating PD on the top of bushing

2.2 套管末屏引线接触不良模型

电压在 8 kV 左右时, 放电稳定记录谱图, 视在放电量约为 350 000 pC。该模型如此巨大的放电量在文[21]中已有报道, 足见末屏接触不良会对套管安全严重的威胁, 对于该放电应有足够的重视。所绘谱图见图 9。通过脉冲电流法和特高频法所测信号相位均分布在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $180^\circ \sim 270^\circ$, 两段区间内放电幅值相近, 放电次数以周期过零点附近最为集中, 总体谱图呈“扁桃”状。末屏引线接触不良也是一种空气中悬浮, 因此谱图有明显高幅值悬浮状特点。

2.3 套管下部均压环悬浮模型

电压在 76 kV 左右时, 放电稳定记录谱图, 视在放电量约为 8 000 pC。所绘谱图见图 10。通过脉冲电流法和特高频法所测信号相位均分布在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 、 $120^\circ \sim 270^\circ$ 和 $300^\circ \sim 360^\circ$, 3 段区间内幅值相近,

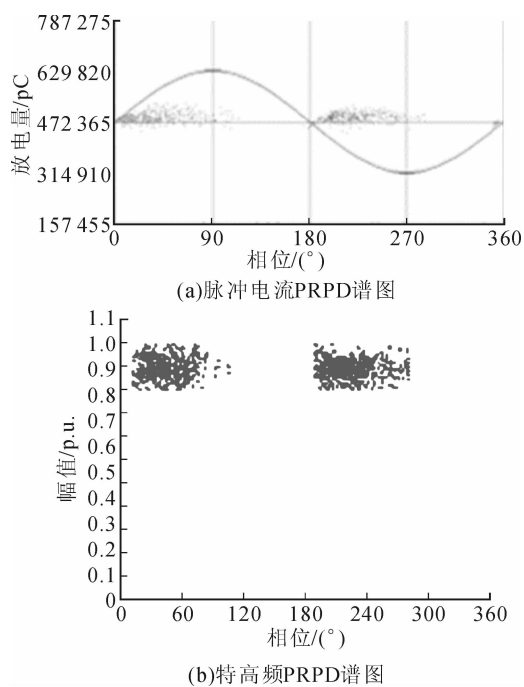


图9 套管末屏引线接触不良谱图对比

Fig. 9 Patterns of bad connection in bushing tap

放电次数分散性大, 总体谱图呈 3 段平行四边形。套管下部均压环悬浮是一种油中悬浮缺陷, 因此有放电幅值分散, 相位更宽分布的特点。

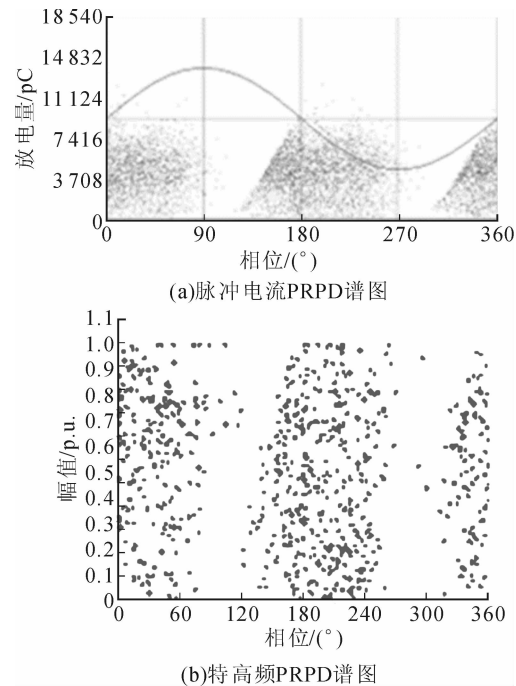


图10 套管下部均压环悬浮谱图对比

Fig. 10 Patterns of floating discharge on the bottom of bushing

2.4 套管下瓷套沿面模型

电压在 27 kV 左右时, 放电稳定记录谱图, 视在放电量约为 1 800 pC。所绘谱图见图 11。脉冲电

- HAN Jinhua, ZHANG Jianzhuang, WANG Wei, et al. Discussion on earthing modes of high voltage bushing end shield in power transformer[J]. Transformer, 2009, 46(6): 64-67.
- [13] 沈煜, 罗维. 变压器套管末屏对现场局部放电测量影响的实例与分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 157-159.
- SHEN Yu, LUO Wei. Case analysis of the influences of bushing tap on on-site PD test for transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 157-159.
- [14] 汪新泉, 贺艳群. 油纸电容式套管局部放电现象及分析[J]. 变压器, 2008, 45(1): 31-34.
- WANG Xinquan, HE Yanqun. Partial discharge phenomena of oil-paper capacitor bushing and their analysis[J]. Transformer, 2008, 45(1): 31-34.
- [15] 邵进, 胡武炎, 贾风鸣, 等. 红外热成像技术在电力设备状态检修中的应用[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 126-129.
- SHAO Jin, HU Wuyan, JIA Fengming, et al. Application of infrared thermal imaging technology to condition-based maintenance of power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 126-129.
- [16] REID A J, JUDD M D, FOURACRE R A, et al. Simultaneous measurement of partial discharges using IEC60270 and radio-frequency techniques[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(2): 444-455.
- [17] REID A J. Identification of simultaneously active partial discharge sources using combined Radio frequency and IEC60270 measurement[J]. Science, Measurement & Technology, IET, 2011, 5(3): 102-108.
- [18] 齐波, 李成榕, 耿弼博, 等. GIS设备绝缘子高压电极故障局部放电严重程度的诊断与评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1719-1727.
- QI Bo, LI Chengrong, GENG Bibo, et al. Severity diagnosis and assessment of the partial discharge provoked by high-voltage electrode defect on GIS insulator surface[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1719-1727.
- [19] 国家电网公司运维检修部. 变压器类设备典型故障案例汇编(2006-2010年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [20] 任晓红, 王伟, 郑健康, 等. 500 kV 变压器套管典型故障及分析[J]. 高电压技术, 2008(11): 2513-2516.
- REN Xiaohong, WANG Wei, ZHENG Jiankang, et al. Typical fault analysis of 500 kV transformer bushings[J]. High Voltage Engineering, 2008(11): 2513-2516.
- [21] 马卫平, 王朔, 程方晓. 油-气套管变压器现场局部放电试验及故障诊断[J]. 吉林电力, 2004, 171(2): 35-37.
- MA Weiping, WANG Shuo, CHENG Fangxiao. Partial discharge testing on site and fault diagnosis for oil-gas bushing transformer[J]. Jilin Electric Power, 2004, 171(2): 35-37.

肖天为(1987—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力设备状态监测。

(上接第 140 页)

- paratus, 2011, 47(8): 1-4.
- [13] 吴姬妮, 蒋卫平, 朱艺颖, 等. 特高压直流输电线路故障过电压的研究[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 6-10.
- WU Yani, JIANG Weiping, ZHU Yiyang, et al. Research on inner overvoltage in UHVDC transmission line caused by flashover to ground fault[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 6-10.
- [14] 吕鹏飞, 王明新, 徐海军. 三广直流鹅城换流站换相失败原因分析[J]. 继电器, 2005, 33(18): 75-78.
- LYU Pengfei, WANG Mingxin, XU Haijun. Analysis of commutation failure reason in Three Gorges-Guangdong HVDC system Echeng station[J]. Relay, 2005, 33(18): 75-78.
- [15] 刘登峰, 李银红, 石东源, 等. 高压直流输电系统直流保护整定预备量分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 47-51.
- LIU Dengfeng, LI Yinhong, DAN Dongyuan, et al. Study on setting preparative parameter of HVDC system protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 47-51.
- [16] 安萍, 苟锐锋, 程晓绚, 等. ± 800 kV 特高压直流换流站过电压保护特点及直流暂态过电压计算[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 351-353.
- AN Ping, GOU Ruifeng, CHENG Xiaoxuan, et al. Characteristic of over voltage protection in ± 800 kV ultra high voltage direct current convert station[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 351-353.
- [17] 王韶. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 53-58.
- WANG Yao. Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 53-58.
- 陈干(1978—), 男, 工程师, 主要从事高压直流输电换流阀和无功补偿设备的研究和设计工作。