

二次波形特征量识别方法在互感器故障监测和分析中的应用

周原¹, 王春平², 舒想¹

(1. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室(广东电网有限责任公司电力科学研究院), 广州 510080;
2. 广东省能源集团有限公司沙角 C 电厂, 广州 510080)

摘要: 电压互感器是电力系统电压监测和继电保护的基础设备, 一旦互感器及其二次回路发生缺陷, 可能导致电压回路异常告警、继电保护动作异常, 对电网正常运行造成威胁。本文从一起电厂厂用母线电压互感器运行中发生的电压告警缺陷入手, 详细论述了现场检查情况和缺陷分析情况, 采用建立互感器设备缺陷内部电路仿真模型的方法模拟实际异常过程, 通过运算获取了与实际暂态过程特征量具备相同特征量的仿真暂态波形, 进而对理论分析结论进行验证。最后, 简要列举了工作中采用该方法复现的其他几类常见典型互感器缺陷, 对不同类缺陷对应的互感器二次电压特征进行了对比分析, 对基于波形特征量提取实现互感器缺陷监测和识别的可行性和应用前景进行论述。

关键词: 互感器; 二次电压监测; 缺陷分析; ATP-EMTP

Application of Secondary Waveform Recognition Method in Fault Monitoring and Analysis of Potential Transformer

ZHOU Yuan¹, WANG Chunping², SHU Xiang¹

(1. Guangdong Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Shajiao C Power Plant of Guangdong Energy Group Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: Potential transformer is the basic equipment for voltage monitoring and protection of power system. The voltage transformer and its secondary circuit will, once in case of defect, likely cause abnormal alarm of voltage circuit and abnormal protection action of relaying protection as well as threaten the normal operation of the power grid. This paper starts from the defect of voltage alarm in the operation of a busbar voltage transformer in a power plant, the site inspection and defect analysis are described in detail. The method of internal circuit simulation model of the defect of the voltage transformer is set up to simulate the actual abnormal process, the simulated transient waveform with the same characteristic quantity as that of actual transient characteristic quality is obtained by calculation, thus the theoretical analysis conclusion is verified. Finally, the other types of common defects of typical instrument transformer, which are replicated by using the method in the work is briefly listed. The secondary voltage characteristic of the instrument transformer corresponding to different defects is compared and analyzed. Moreover, the feasibility and application prospect to achieve the defect monitoring and identification based on the waveform characteristic quality is described.

Keywords: potential transformer; secondary voltage monitoring; defect analysis; ATP-EMTP

0 引言

互感器是电网运行中不可或缺的重要设备,随着各类互感器在电网中大量使用,厂家工艺、产品本身质量、运维方法错误等导致的问题逐渐显现,互感器缺陷率与其他设备相比处于较高水平。一旦互感器及其二次回路发生缺陷,将导致电压回路异常告警、继电保护动作异常,对电网正常运行造成威胁。目前互感器缺陷主要依靠停电试验、红外监测、油位监测等方法进行发现,存在测试周期长、早期缺陷识别不灵敏的现象。虽然保护监控装置具备开口三角电压、相间电压不平衡及相电压越限告警^[1],但往往仅针对母线电压互感器,且无法明确识别缺陷类型。对于配网大量应用的电磁式电压互感器(potential transformer, PT)以及主网变电站的电容电压互感器(capacitive voltage transformer, CVT)甚至不进行监测,造成大量缺陷并未及时发现。缺陷类别查找和识别困难也导致早期缺陷处置不及时,放任缺陷的发展直至设备损坏或进一步导致二次保护跳闸才得以重视和补救,造成运行风险和经济损失。例如运行中曾出现某变电站的500 kV线路侧 CVT 低频饱和导致500 kV线路过电压保护动作,线路重合闸失败三相跳闸案例,以及互感器熔断器熔断导致发电厂低压解列保护动作等案例。可见互感器缺陷不仅关乎互感器自身稳定性,还对继保、测量有潜在的缺陷,在电网智能化和数字化建设的新形势下,有必要对互感器的异常运行状态进行及时地系统识别,提高互感器设备早期缺陷的识别和预警能力^[1-4]。

相关研究指出,大部分互感器缺陷可通过二次电压得以反映^[5-9]。例如,在佛山等地基于调度 EMS 电压信息构建了互感器状态监测系统,在不增加一次^[10]硬件投入的情况下,只利用目前已有的二次数据实现基于二次电压的 CVT 的准实时在线监测^[11-12]。相比传统停电预防性试验更能够及时的发现潜在缺陷取得了良好效果,并指出“除了判断数据合格与否外,还应该关注数据变化的趋势”,该局正在考虑逐步开展包括互感器在内的变电设备周期性预防性试验替代,推进设备运行维护由“周期性检修”逐步向“状态检修”转变。

互感器结构简单,运维中将常见缺陷归纳为信号告警、过热、电气试验不合格等,其中与电气参数相关的缺陷可进一步根据缺陷位置划分为12类。除了电容分压器缺陷外,其中大部分可通过二次电压变化得以反映。目前仅有电容分压器缺陷实现了监测,但仍存在部分缺陷导致电压有效值的变化而

归为电容缺陷,进而导致判断错误。部分缺陷的二次电压发生峰值、谐波含量、波形畸变等方面变化而并未开展监测等问题。因此,现有工作是远远不够的,得出的结论也是相对粗糙,这就需要依托理论分析和仿真分析方法对各类常见典型的互感器缺陷进行更准确全面的分析识别,提升监测方法的准确性。

本文从一起发电厂厂用母线电压互感器运行中发生的二次电压告警缺陷入手,通过现场检查对缺陷的原因进行了确认,对造成二次电压异常的原因进行了分析,通过 ATP 仿真方法建立了互感器缺陷仿真模型,通过设置接触不良缺陷对故障过程进行了波形复现,通过对实测波形和仿真波形特征量的对比分析确认了缺陷的原因,给出该类典型缺陷的二次电压特征及识别方法。最后,列举了日常工作中其他典型缺陷类别结论和特征量,论证了基于波形特征量实现互感器缺陷监测和识别的可行性和必要性。

1 故障实例

2021年7月,某电厂厂用高压母线上的1号机后备备用电源自投装置出现工作母线B段互感器断线报警,报警信号短暂出现后消失,对屏内相关电压回路接线进行紧固性检查,未发现明显回路松动或接触不良现象。8月1日,缺陷并未引发报警,但观察1号机故障录波实时波形发现10 kV 1B段母线A、B相均为65 V, C相电压波形正常,但有效值仅为58 V,比其他两相偏低且异常现象稳定存在。

8月10日,缺陷发生了进一步发展,1号机后备备用电源自投装置又频繁出现工作母线B段互感器断线报警,对1号机故障录波器录波记录进行检查发现,10 kV 1B段母线电压频繁启动录波。故障录波波形见图1。

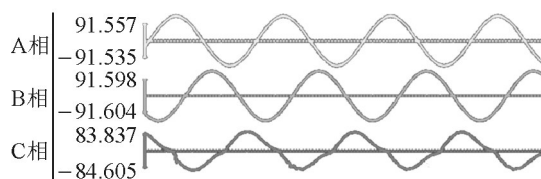


图1 故障录波波形
Fig. 1 Record waveform of fault

对录波波形进行分析发现,稳态量启动时,A、B相电压正常,10 kV 1B段母线C相电压下降至44 V,且波形出现明显畸变现象,用录波软件对波形进行相量分析,C相电压中含有较大的谐波分量。观察1B厂高变低压侧三相电流平衡无异常,1号主变低压侧及1号发电机机端电压均正常,除了以上稳态量启动外,装置还发生突变量启动。在突变量启动

期间,C相电压略有下降,其余两相电压未见异常。

2 缺陷查找

根据以上缺陷特性可见,该缺陷呈现逐步严重趋势,因此电厂在8月10日报警信息出现后,开始对缺陷进行查找。由于当时10 kV公用B段由1B厂高变通过10 kV 1B段供电,为排除异常现象是否由一次设备故障引起,在1号发变组保护中观察1B厂高变低压侧三相电压平衡,均为65 V(10 kV 1B段进线PT);在1号后备备用电源自投装置处测量10 kV公用B段母线三相电压平衡(10 kV公用B段母线PT),判断相关一次设备工作正常,且因为1B厂高变低压侧三相电流对称,排除三相负荷不平衡的原因,判断异常现象应由10 kV 1B段母线C相PT二次侧及其回路引起。

因1号故障录波器及1号后备备用电源自投装置均出现C相电压偏低现象,进一步对10 kV 1B段母线PT二次引出线进行检查,发现在051B联络开关柜内,71端子(C相PT二次出线)中间连接片未合到位,现场情况见图2。



图2 相电压端子中间连接片未合到位
Fig. 2 The middle connecting piece of terminal of phase voltage is not closed to final position

端子未合到位缺陷接线电气图见图3,端子中间连接片处于异常状态,用万用表电压档测量发现端子两侧存在2 V左右的压差,存在分压现象。检修人员用短接线将71端子前后短接后,重新紧固中间连片,在1号故障录波器及1号后备备用电源自投

装置观察10 kV 1B段母线三相电压已恢复正常,后续将结合母线停电后对该端子进行更换处理。

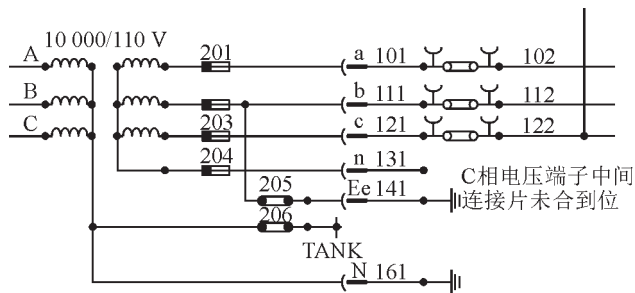


图3 端子未合到位缺陷接线电气图
Fig. 3 Wiring schematic diagram when the terminal is not closed to final position

综上,通过现场测试不同位置电压并进行对比,可以明确二次回路电压差异和报警是由于二次回路异常引起的。具体原因应为10 kV 051B开关柜71端子(C相PT二次出线)中间连接片有异常,未能完全连接到位,051B联络开关柜在长期运行过程中受外界环境振动累积影响,使柜内71端子中间连接片接触不良情况恶化,最终导致10 kV 1B段母线C相PT二次电压偏低。

3 仿真分析

为验证录波分析中发现的谐波特征,采用电磁暂态仿真软件ATP-EMTP对该暂态电压波形进行模拟,从实际消缺过程可以看出,1号机后备备用电源自投装置出现工作母线B段互感器断线报警,而在1号后备备用电源自投装置处测量10 kV公用B段母线三相电压平衡(10 kV公用B段母互感器),已经可以明确排除PT本体异常,因此必须从不同二次回路的差异上找原因。本文使用ATP-EMTP构建了典型互感器及其二次回路模型,并采用压控开关模拟端子未合到位引起的间隙放电对回路异常电压的影响,建立的仿真模型见图4。

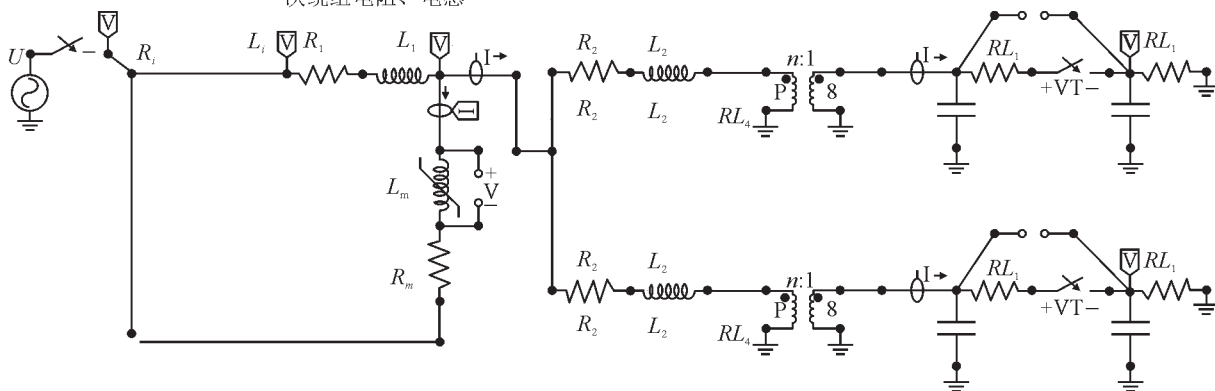


图4 互感器接地异常仿真电路
Fig. 4 Simulation circuit of abnormal grounding of voltage transformer

图4给出的模型中将外部系统整体等效为幅值为10 kV,等效内阻抗为高压厂用变压器短路阻抗的电源。电源额定线电压为10 kV,为考虑互感器励磁支路的非线性特性,采用了具有饱和特性的电感元件对PT励磁回路铁心进行模拟,采用压控开关及串联电阻置于保护绕组与故障录波器的等效阻抗之间,用以模拟合闸不到位引起的接触不良。控制该间隙在电压高于20 V时击穿,电弧在电流过零点熄灭,得到二次输出电压仿真波形见图5。

图5模拟了互感器绕组引出二次回路在正常和发生接触不良问题时的二次电压对比图,对比图5中的模拟故障波形与图1中的C相(故障相)实测波形可见,两波形具备一致的畸变特性:由于端子处存在间隙,在电压作用下发生周期型放电,引起波形在过零点附近出现间断或者陡度降低,在间隙稳定导通后二次回路引入了一个附加电阻,导致电压峰值的降低,这也与实测端口间存在电压差的现象一致。每次间隙两端电压上升过程导致放电电弧的燃烧,因此电压波形在上升至峰值和下落期间与正常回路一致,不存在其他间断或震荡等暂态过程,这也表明缺陷类别为串联形式的间歇性放电缺陷。

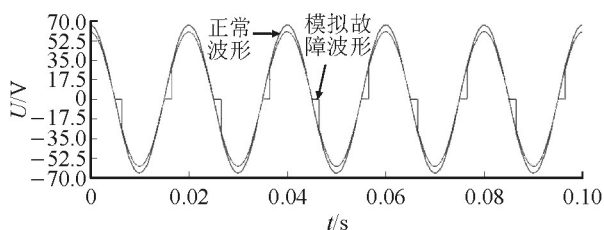


图5 CVT接地异常仿真二次输出
Fig. 5 Secondary output of abnormal grounding of CVT

仿真中压控开关逻辑判断方式为:电压超过设定值时开关进行合闸模拟电弧的产生,当电弧电流小于一定值时与实际端口复杂的物理特性存在差异,导致零点处电压导数出现突变,与实际的缓慢变化存在一定差异。此外,对仿真得到的波形进行傅里叶分析,发现波形中存在复杂的高次谐波分量,谐波含量见图6,这与实际观测到的高次谐波含量增大的现象一致。

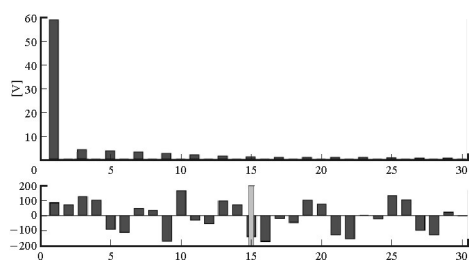


图6 仿真缺陷波形的谐波含量
Fig. 6 Harmonic content of simulated defect waveform

由上图给出的仿真得出缺陷波形的谐波幅值及相角分布情况可见,缺陷过程中系统谐波成份大幅上升的情况,其中3次、5次谐波分别达到了4 V、3 V,高次谐波含量的上升也表明回路出现了闪络放电等突变过程。

通过对本案例进行分析,我们也认识到互感器二次电压异常的原因不能局限于一次设备角度,而忽视了二次回路可能存在的隐患及其对测量稳定性的影响,如果要迅速定位并排除缺陷,必须从全局角度出发分析。实际运行中设备二次回路节点众多,排查难度大,一、二次由不同专业维护人员负责,这进一步增加了缺陷查找的难度。而二次电压波形数据信息是整个监测回路的整体反映,如果能充分整理本体及其二次回路缺陷案例,对异常二次波形进行系统分析实现缺陷类别的初步判断,可以更好的指导一、二次运维人员开展缺陷处理工作,提高工作效率^[13-14]。

4 其他典型互感器状态监测实例

日常运维工作中通过构建各类典型互感器缺陷仿真模型的方式开展了大量的故障分析工作,积累了各类缺陷的典型二次电压波形及特征量,验证了大部分缺陷可以在二次波形的有效值、相位、电压突变量及发生时刻、谐波含量等特性中体现,无需另外安装监测装置,甚至可以推断今后随着数据的不断丰富,可通过不断完善缺陷判据以及机器学习的方法,仅基于监测手段实现互感器状态判断,无需开展例行的停电预试,从而大幅促进互感器维护水平的提升,降低停电测试的时间和人力成本^[15-16]。

下文简要汇总了日常工作中处理过的几类典型缺陷及其缺陷二次波形特征,对不同缺陷特征量进行了对比分析,提出了缺陷识别判据,说明了信号采集及预警周期选取时所考虑的问题。

4.1 电容分压器缺陷监测

日常运维中信号告警、过热和电气试验不合格3类缺陷占互感器缺陷的近80%。在信号告警中,大部分的工频电压上升或下降是由于电容器单元缺陷导致的。针对这一类主要缺陷,已有研究通过对互感器二次电压进行采集并进行纵向(时间维度)或横向(同站同相电压互感器之间)比较实现了互感器电容缺陷的监测^[17-20]。基于这一经验,目前我们在省级生产指挥中心建立了统一的CVT运行状态监测预警平台,在电压偏差接近或超出2%阈值时进行报警。平台发现的一例典型的电容分压器电容心子缺陷监测图见图7。

从图7可见,2020年9月之前B相、C相两相CVT电压较为一致,A相电压比B、C两相偏低1.5%左右,并未触发监测预警;2020年9月C相电压也跌落至与A相电压基本一致水平。2021年8月,C相电压发生第二次跌落,跌落后C相电压进一步降

低,与B相电压偏差扩大至3.8%左右,超出了2%的报警阈值,表明该C相CVT电容分压器部分心子发生击穿缺陷并且缺陷呈扩大趋势,经对电容器分压器进行解体检查,发现C相电容部分电容心子内部缺陷如图8所示。

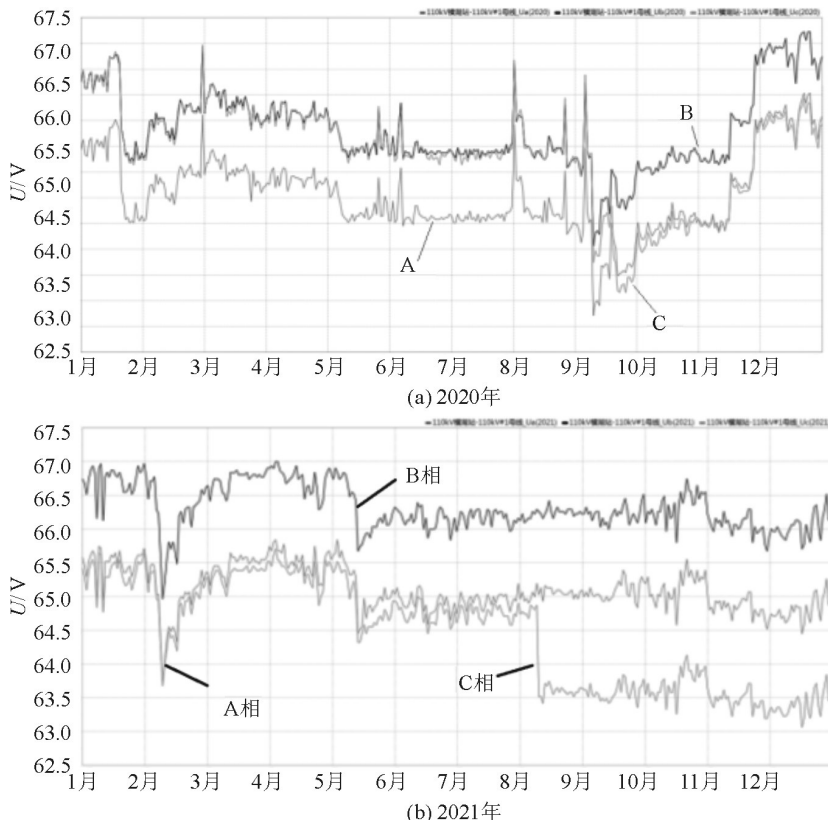


图7 某站110 kV母线CVT三相电压

Fig. 7 Three-phase voltage of 110 kV bus CVT of certain substation

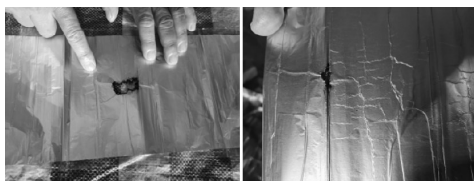


图8 110 kV某母线C相CVT解体情况

Fig. 8 Disassembly of CVT of phase C of certain 110 kV bus

可见电容心子缺陷发展缓慢,缺陷的程度呈现阶梯型递进趋势。电容分压器中电容心子正常状态下绝缘强度高,个别心子由于设计、材料选用或制造工艺环节出现问题可能导致电容器心子中存在电弱点使电场强度分布不均,长期承受系统电压时导致击穿,但电容心子正常状态下绝缘强度高,可以通过监测及时发现问题并进行处置,通常二次电压升高表明 C_1 电容元件有击穿;二次电压降低表明 C_2 电容元件有击穿。只要对电压有效值开展长期监测,对图7中的电压单次突变量和累计变化量进行监测,即可实现缺陷的识别。

4.2 CVT末端未接地

CVT末端未接地缺陷往往是由于检修后人为

疏忽引起的,是互感器缺陷的主要类别。由于接地端子悬空,在投运后尾端引出二次端子与外壳发生持续性放电,持续运行如一个月或更长一段时间后闪络处的密封性受到破坏导致发生受潮和漏油等问题,最终引起设备损坏。对该缺陷进行模拟,得出放电过程电压波形变化见图9。

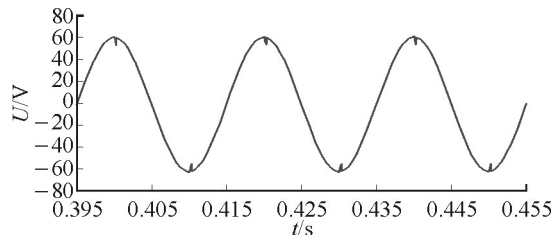


图9 典型中压电容未接地缺陷时域波形

Fig. 9 Time-domain waveform of a typical medium-voltage capacitor in ungrounded defect

由图9仿真电压波形可见,电压波形表现为电压峰值处的波形陡降并出现波形缺口,而在波形其他位置以及过零点无明显间断或畸变。该类波形畸变即可通过峰值处的波形突变量进行触发识别,也可以通过对整体波形中高次谐波变化量进行监

测获取,从而实现缺陷的识别。

4.3 电磁单元一次首末端闪络

该类缺陷是由于电磁单元油箱内的绝缘板击穿导致的,典型故障录波和仿真波形对比见图 10。

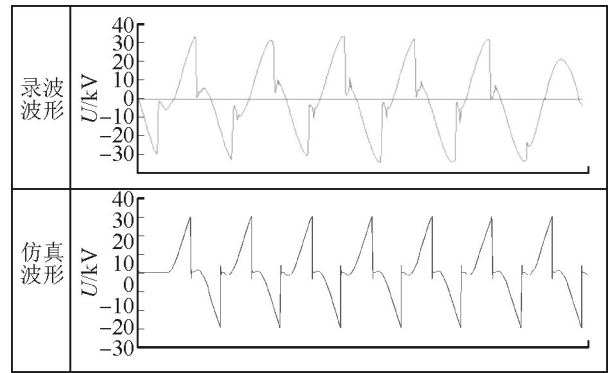


图 10 典型电磁单元一次首末端闪络电压仿真及实测波形
Fig. 10 Simulated and measured waveform of the flashover voltage from the head end of the typical electromagnetic unit

可见,该类缺陷波形均表现为每周期突变两次,电压在接近正负峰值处发生电压快速跌落,而在两次突变之间波形的上下平移,这是由于电磁单元首末端闪络造成了分压电容器的反复充放电,具备明显的周期性特点,可将波形突变量的幅值和每周期突变次数作为缺陷的识别依据。

4.4 CVT 低频饱和导致变比失真

CVT 低频饱和导致变比失真异常不是 CVT 自身的问题导致的,而是由于系统异常状态下发生的 CVT 传变特性失真。例如,本案例中在 500 kV 线路单相接地故障单相跳闸后出现了拍频谐振,这是线路采用高抗补偿时单相跳闸后的典型波特征。然而,该线性谐振存在低频成分导致 CVT 饱和,导致 CVT 变比降低和二次电压升高,当升高幅值超出过电压保护阈值时,可导致过电压保护误动作。单相跳闸后实测波形和仿真波形见图 11。

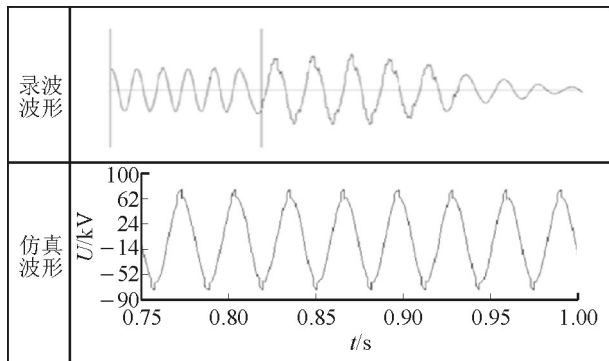


图 11 CVT 典型低频谐振仿真及实测波形
Fig. 11 Typical low-frequency resonance simulation and measured waveform of CVT

典型低频谐振频谱见图 12,可见该畸变波形

主要频率为 32.5 Hz,低于正常运行频率,通过仿真建模可复现低频下 CVT 变比失真特性。

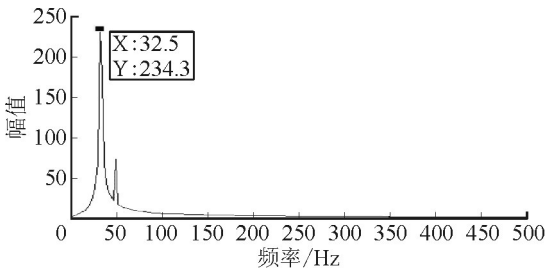


图 12 典型低频谐振频谱
Fig. 12 Typical low frequency resonance spectrum

由图 11 和图 12 可见,该类问题虽然不属于 CVT 本体缺陷,但也可以归纳为 CVT 一变比失真状态,需要在今后的跳闸故障原因分析排查时进行考虑。观察波形可见,该波形由铁磁单元的非线性特性引起,波形不具备突变特性,且低频谐波含量高,与其他绝缘失效类缺陷、电容缺陷等具有明显差别,可以通过低频和基频幅值变化进行监测进行识别。

5 互感器监测预警必要性讨论

本文列举了互感器几类典型缺陷并讨论了可用于缺陷识别的波形暂稳态特征量,概括描述如下:1)电容分压器缺陷表现为稳态电压的阶梯性上升或下降;2)中压电容未接地缺陷表现为电压峰值处的波形陡降和缺失,但过零点处波形连续;3)二次回路接触不良问题表现为过零点的电压不连续;4)电磁单元一次首末端绝缘不良闪络表现为电压以半周波为周期的波形突变和上下平移;5)低频谐振表现为主要低频谐波含量的变化以及电压峰值处畸变和变比降低。综合以上特性制定不同的时域波形识别策略,可非常方便的进行智能识别。

除了以上典型缺陷,还有少部分缺陷如中间变压器受潮、阻尼器故障等通过二次电压难以识别,这就需要构建多维度的 CVT 缺陷监测预警体系,充分利用油位监测、图像视频监控、人工巡维等多种监测方法综合判断,也是当前开展电网运维智能化、数字化转型的必然要求和有利补充^[21-24]。

缺陷的识别还需统筹考虑不同类别缺陷的发展进程的差异性而制定相应的预警级别。例如,从缺陷发生直至缺陷甚至跳闸,对于中压电容端子未接地缺陷可能持续一个甚至几个月直至密封损坏才被发现;而中间变压器绕组缺陷可能发展速度较快,需要尽快停电处理^[21-24];对于电容分压器缺陷,个别原件击穿不影响设备短时间内运行的安全性,

击穿缺陷可以通过长周期的监测方法进行跟踪和趋势判断。根据缺陷的紧迫性差异需要制定合理的预警级别,便于更合理的制定缺陷处置方案。

在装置层面,开展基于互感器二次电压的互感器状态监测预警无需改动系统一次接线,但可能需要在现有故障录波之外安装电压波形高频采集装置,以满足对缺陷过程中的谐波和电压突变量监测需求,装置需触发灵敏、运行稳定。也可以对现有谐波监测等装置进行升级改造,实现在不另外增加监测成本的基础上,仅扩展软件性能即可开展监测分析工作,甚至融入大数据和人工神经网络算法等实现缺陷的自动高效识别,也进一步践行了电网数字化建设要求。

6 结语

本文结合一起发电厂厂用母线段设备电压异常缺陷,通过建立仿真模型对缺陷进行了复现,通过构造与缺陷过程波形具备相同特征的仿真波形,对缺陷引起的二次电压异常的原因、电压波形特征进行了探讨,从而对同类缺陷的处理提出了建议,最后,本文对采用暂态电压进行缺陷识别的可行性进行了探讨,得出基于二次电压特征量实现绝大部分互感器缺陷监测的结论。暂稳态电气量信息的监测和挖掘除了在互感器监测领域能够展现其极大的应用前景以外,在电网其他主要设备及其所处外部环境的监测方面也具备非常重要的价值,采用电气暂稳态特征量监测方法进行设备和系统运行情况监测分析是提升电网设备管控水平重要途径,具备广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 何建,余睿,杨漪俊. 电容式电压互感器常见故障及监测[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(5):38-42.
HE Jian, YU Rui, YANG Yijun. The common faults and its monitoring of CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(5): 38-42.
- [2] 易冉,梁育雄,黄启泰,等. 一起220 kV CVT二次失压故障的分析与试验[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(5):86-91.
YI Ran, LIANG Yuxiong, HUANG Qitai, et al. Fault analysis and test on secondary voltage loss of 220 kV capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5): 86-91.
- [3] 戴钦来,刘小波,熊华维,等. 220 kV电容式电压互感器介损试验不拆一次引线分析[J]. 电工电气,2017(7):59-61.
DAI Qinlai, LIU Xiaobo, XIONG Huawei, et al. Non-removing primary leading wire analysis of 220 kV capacitor voltage transformer dielectric loss test[J]. Electrotechnics Electric, 2017(7): 59-61.
- [4] 王守鹏,赵冬梅. 电网故障诊断的研究综述与前景展望[J]. 电力系统自动化,2017,41(19):164-175.
WANG Shoupeng, ZHAO Dongmei. Research review and prospects for power grid fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 164-175.
- [5] 田晓云,朱治海,王亚平. 电容式电压互感器二次电压偏高的原因分析[J]. 内蒙古电力技术,2009,27(5):47-49.
TIAN Xiaoyun, ZHU Zhihai, WANG Yaping. Cause analysis on higher secondary voltage of capacitor voltage transformer[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2009, 27(5): 47-49.
- [6] 郑坚强,陶涛,万文博. 浅析一例110 kV电容式电压互感器二次电压失压故障[J]. 变压器,2012,49(7):73-76.
ZHENG Jianqiang, TAO Tao, WAN Wenbo. Brief analysis of secondary voltage fault in 110 kV capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2012, 49(7): 73-76.
- [7] 洪乐洲,吴贻志,李靖翔,等. 电容式电压互感器二次电压异常分析处理[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(3):73-76.
HONG Lezhou, WU Yizhi, LI Jingxiang, et al. Analysis and treatment on abnormal secondary voltage of capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(3): 73-76.
- [8] 陈润颖,王周祥. 电容式电压互感器介损增长异常分析[J]. 电网与清洁能源,2012,28(4):31-34.
CHEN Runying, WANG Zhouxiang. Abnormal growth analysis of dielectric loss factor in capacitor voltage transformer[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(4): 31-34.
- [9] 张广东,温定筠,胡春江,等. 一起CVT故障的处理及分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(1):64-67.
ZHANG Guangdong, WEN Dingjun, HU Chunjiang, et al. Treatment and analysis of one CVT fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1): 64-67.
- [10] 邱太洪,陈贤熙,张伟忠,等. 基于能量管理系统数据的电容式电压互感器二次电压在线监测在绝缘诊断中的应用[J]. 绝缘材料,2019,52(1):68-72.
QIU Taihong, CHEN Xianxi, ZHANG Weizhong, et al. Application of online monitoring of capacitor voltage transformer secondary voltage in insulation diagnosis based on EMS data[J]. Insulating Materials, 2019, 52(1): 68-72.
- [11] 邢立坤,李国伟,王俊波,等. 一起110 kV CVT红外异常的诊断分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(1):68-72.
XING Likun, LI Guowei, WANG Junbo, et al. Diagnostic analysis on abnormal infrared of one 110 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1): 68-72.

- [12]程艳霞,闫尚斌,唐领英. 110 kV及以上电容式电压互感器故障典型案例分析[J]. 电力学报, 2013, 28(2): 131-134.
CHENG Yanxia, YAN Shangbin, TANG Lingying. The typical fault analysis of 110 kV and above capacitor voltage transformer[J]. Journal of Electric Power, 2013, 28(2): 131-134.
- [13]王俊波,李慧,邱太洪. 基于数据挖掘的CVT电容元件击穿故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 96-100.
WANG Junbo, LI Hui, QIU Taihong. Breakdown fault analysis of CVT capacitor elements based on data mining[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 96-100.
- [14]宋守龙,谭彦民,李小燕. 一起电容式电压互感器二次电压不平衡故障的分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(2): 42-44.
SONG Shoulong, TAN Yanmin, LI Xiaoyan. Analysis on secondary voltage unbalance fault of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(2): 42-44.
- [15]张超,丁心志,王宾. 基于时域解析法的电容式电压互感器铁磁谐振分析与抑制[J]. 广东电力, 2022, 35(10): 56-64.
ZHANG Chao, DING Xinzhi, WANG Bin. Analysis and suppression of ferroresonance of capacitive voltage transformer based on time domain analytical method[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 56-64.
- [16]姚创,魏菊芳,于顺智,等. 基于流敏电阻的电磁式电压互感器高压侧消谐技术研究[J]. 广东电力, 2023, 36(12): 97-105.
YAO Chuang, WEI Jufang, YU Shunzhi, et al. Research on harmonic elimination technology at high voltage terminal of inductive voltage transformer based on current dependent resistor[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(12): 97-105.
- [17]童钰,房博一. 一起220 kV线路CVT故障分析及防范措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(4): 78-82.
TONG Yu, FANG Boyi. Fault analysis and prevention measures of CVT in 220 kV line[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(4): 78-82.
- [18]穆靖宇,华超. 一起CVT分压电容器击穿事故的处理和分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(4): 75-78.
MU Jingyu, HUA Chao. Treatment and analysis of a breakdown fault of CVT dividing capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(4): 75-78.
- [19]刘胜军,霍春燕,何燕,等. 一起220 kV CVT二次电压偏高的分析处理[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(4): 69-74.
LIU Shengjun, HUO Chunyan, HE Yan, et al. Analysis and treatment on higher secondary voltage of one 220 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(4): 69-74.
- [20]刘辉. 电容式电压互感器电容量和介损试验方法的探讨[J]. 变压器, 2009, 46(11): 44-47.
LIU Hui. Discussion on capacitance and dielectric dissipation factor test method for capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2009, 46(11): 44-47.
- [21]陈玉峰,李永宁,尹奎龙,等. 电容式电压互感器油箱过热故障分析[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 486-488.
CHEN Yufeng, LI Yongning, YIN Kuilong, et al. Analysis of CVT's oil tank overheating faults[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 486-488.
- [22]刘宏亮,刘海峰,岳国良,等. 电容式电压互感器的运行故障监测[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 62-65.
LIU Hongliang, LIU Haifeng, YUE Guoliang, et al. Operation fault monitoring on capacitive voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3): 62-65.
- [23]李顺尧,陈世昌,刘勤锋,等. 电容式电压互感器带电监测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(6): 47-52.
LI Shunyao, CHEN Shichang, LIU Qinfeng, et al. Live monitoring methods on capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(6): 47-52.
- [24]李光茂. 广州电网2005~2015年CVT运行分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(3): 110-115.
LI Guangmao. Operation analysis of CVT in Guangzhou grid from 2005 to 2015[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 110-115.

作者简介:

周原(1983—),女,正高级工程师,主要研究方向在线监测、互感器特性研究。E-mail: gddkzy@126.com。