

电容式电压互感器状态监测技术研究现状与发展

陈涛涛, 陆金, 许小飞

(国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 作为电力系统中重要的测量、保护、通信设备, 电容式电压互感器(CVT)的稳定运行对电网安全至关重要, 然而其运行故障时有发生, 检修工作需耗费大量的人力和物力, 根据 CVT 的现场运行经验来看, 对其进行实时、精确、高效的状态监测仍是一大难点。介绍了 CVT 各组成部件的常见故障类型及故障产生机理, 并对其状态监测方法进行详细论述与分析, 展望了 CVT 状态监测方法的发展趋势和方向。

关键词: 电容式电压互感器; 状态监测; 故障机理; 电磁单元; 电容量; 介损

中图分类号: TM451

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)05-0063-04

电容式电压互感器(CVT)是变电站重要的电力设备, 主要用于测量、继电保护、同步检测、长距离通信、遥测和监控系统等。相比电磁式电压互感器, CVT 不仅结构简单、经济安全, 而且从根本上解决了 CVT 铁磁谐振问题, 同时还可兼作耦合电容器用于载波通信系统等。因此, CVT 在 110 kV 及以上电网系统中得到了广泛应用^[1]。

然而在实际运行中, 受设计水平、制造工艺等系统操作多种因素的制约, 特别是线路投切、投入或退出某些设备等系统操作过程, CVT 运行故障率居高不下, 对电网安全运行造成严重影响^[2-5]。笔者根据现场运行经验, 对 CVT 各电气组成部件的运行故障及 CVT 常见状态监测方法进行论述和分析, 并提出未来 CVT 状态监测的发展趋势。

1 CVT 常见故障类型及产生机理

CVT 由电容分压器和电磁单元两部分组成, 其结构示意图及电气原理如图 1 所示。电容分压器部分由 2 台耦合电容器 C_{11} 和 C_{12} 及 1 台分压电容器 C_2 叠装串联组成, 每台电容器的芯子由若干电容元件串联后封装在瓷外壳内, C_{11} 和 C_{12} 串联后构成电容分压器的高压电容 C_1 , C_2 构成电容分压器的中压电容。电磁单元由装在同一油箱中的中间变压器、补偿电抗器 L 、阻尼器 Z 组成。补偿电抗器两端一般并联有限制过电压的保护间隙或氧化锌避雷器。电容分压器低压端 N 与补偿电抗器低压端 X 引出至油箱前侧的出线盒内, 其间可承载波装置。正常运行时 X 端接地, 载波装置退出运行时, N 端应与 X 端可靠短接并接地。

总结 CVT 故障类型, 按 CVT 各组成部件归结起来主要有以下几类常见故障: (1) 电容分压器故障; (2) 中间变压器故障; (3) 保护间隙(避雷器)故障; (4) 阻尼器故障。

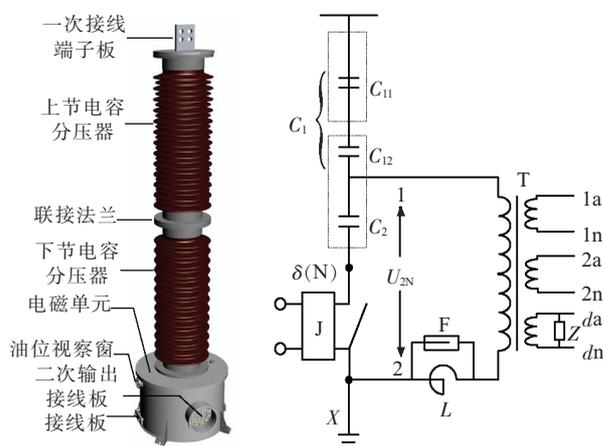


图 1 CVT 结构及电气原理

1.1 电容分压器故障

电容分压器由主电容 C_1 和分压电容 C_2 组成, 故其故障主要指主电容故障和分压电容故障。电容分压器故障具体表现在运行过程中电容元件出现不同程度的受潮、老化、绝缘降低, 严重时出现击穿、爆炸等现象, 对 CVT 安全稳定运行带来极大的安全隐患^[6,7]。

导致电容单元故障的原因很多。具体主要有: 电容器极板间出现间隙或气泡导致绝缘弱化, 产生局部放电甚至单元击穿; 引箔片的分切和在电容元件卷绕过程中的插引工序不符合工艺要求, 造成薄膜被刺伤, 导致局部绝缘降低; 电容分压器长期渗油导致电容元件长期运行在少油环境中, 造成内部受潮和过热, 最终烧毁电容元件; 厂家干燥处理工艺不合格, 残余水分较大, 存在局部受潮现象, 导致潜伏性缺陷等。

1.2 中间变压器故障

中间变压器在 CVT 运行中承担变换和传递电压的作用, 是 CVT 关键的功能部件。因中间变压器缺陷而导致 CVT 运行故障的案例数见不鲜, 中间变压器常见的故障现象主要有高低压绕组绝缘损坏、高低压绕组出现匝间或层间短路、高压绕组出现断线等。中间变压器故障对 CVT 安全运行危害较大, 其运行状况也成

为近来关注和监测的焦点^[8,9]。

从故障产生的原因看,有以下几个方面:油箱因密封不良而进水受潮,绝缘强度急剧降低,导致绕组在高电压下绝缘被击穿,出现匝间或层间短路,并对地放电;生产过程中,因一次绕组漆包线质量问题或设备过于老旧而在长期运行过程中出现匝间绝缘损坏,导致绕组首尾贯穿性短路;二次绕组短路导致一次绕组过流,最终因过热烧毁绕组造成断线;电磁单元到分压电容器之间的连接引线过长,装配时因磨损造成对箱体绝缘降低,引起放电等。

1.3 保护间隙(避雷器)故障

CVT 保护避雷器的作用是当 C_2 上出现异常过电压时,保护避雷器先击穿以保护补偿电抗器、分压电容和中间变压器。虽然保护避雷器的故障率相比其他故障类型相对较低,但作为 CVT 内部重要的保护装置,其运行故障将造成邮箱过热、CVT 角比误差变大、二次电压异常、三相电压不平衡等现象,对 CVT 测量、保护等功能带来严重影响^[10]。

引起保护避雷器故障的主要原因有产品生产工艺把关不严谨、质量管理不到位,导致避雷器元件在高压作用下被击穿;避雷器内部存在阀体严重受潮或劣化产生放电,阀片劣化绝缘下降引起避雷器绝缘降低。

1.4 阻尼器故障

CVT 受到二次侧短路、断路器等冲击作用时,可能产生谐波铁磁谐振,阻尼器的作用就是消除可能产生的铁磁谐振过电压。阻尼器故障在 CVT 运行过程中也时有发生,阻尼器故障后,1/3 次谐波将在中间回路中产生大电流和过电压,对互感器绝缘和测量仪表、继电器都将造成危害,且可能导致保护装置误动作^[11]。

阻尼器故障一般是因阻尼器中电容元件缺陷而导致的过热故障。阻尼器由电容器和电抗器元件并联而成,在正常运行条件下,呈工频并联谐振状态,但电容器元件会受较大的操作过电压等作用而击穿损坏,破坏了工频谐振条件,使流过阻尼器的工频电流激增,造成电磁单元发热等现象。

2 CVT 常见故障特征监测方法

根据 CVT 长期现场运行经验和各种故障案例分析,目前用于 CVT 状态监测的方法主要有:二次电压监测法、绝缘监测法、红外热成像监测法、油色谱监测法等。

2.1 二次电压监测法

CVT 的电容单元及大多数电磁单元故障缺陷通常会导致二次电压异常,故对其二次电压进行监测是 CVT 状态监测技术中重要方法之一^[12-15]。为定量分析 CVT 二次电压与故障特征的关系,对图 1 中 1-2 左侧部分应用戴维南定理,得其等效电路如图 2 所示。

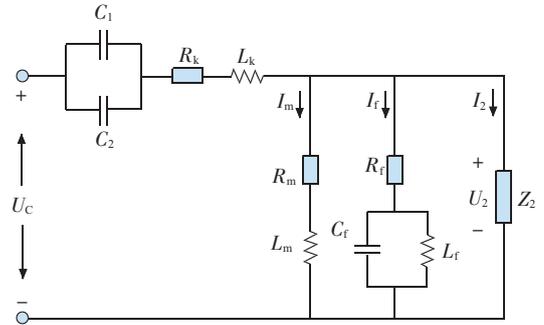


图 2 CVT 简化等效电路

其中: C_1, C_2 为 CVT 高压电容和中压电容; R_k 和 L_k 分别为补偿电抗器及中间变压器的电阻和电感; R_m 和 L_m 分别为中间变压器励磁支路电阻和电感; Z_2 为折算到一次侧的负载阻抗; R_f, C_f, L_f 分别为阻尼器的电阻、电容和电感; I_m, I_f, I_2 分别为流过励磁支路、阻尼器和负载的电流; U_2 为折算后的二次输出电压; U_c 等效电压源电压。

令单只电容单元的电容量为 C_N , C_1, C_2 分别有 N_1, N_2 个电容单元串联组成,则上、下节的主电容量分别为:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{C_N}{N_1} \\ C_2 = \frac{C_N}{N_2} \end{cases} \quad (1)$$

根据电路理论,等效电压源 U_c 的电压为:

$$U_c = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1 = \frac{N_1}{N_1 + N_2} U_1 \quad (2)$$

根据式(2),当高压电容 C_1 中有 n 个电容单元发生击穿短路后,等效电压源 U_c 的电压为:

$$U_c = \frac{N_1}{N_1 + N_2 - n} U_1 \quad (3)$$

当分压电容 C_2 中有 n 个电容单元发生击穿短路后,等效电压源 U_c 的电压为:

$$U_c = \frac{N_2 - n}{N_1 + N_2 - n} U_1 \quad (4)$$

由于等效电容与补偿电抗器相互补偿作用, CVT 折算后的二次电压大小与等效电压源 U_c 近似相等。故针对电容单元故障,总结二次电压监测法的故障判据为:当高压电容 C_1 部分出现击穿时,二次电压升高;当高压电容 C_2 部分出现击穿时,二次电压降低。

此外,电磁单元故障通常也会引起二次电压异常。例如,中间变压器一次、二次绕组开路或短路,会造成二次电压无输出;中间变压器绕组有匝间短路、接触不良、绝缘老化、二次负荷过大等故障时,二次电压降低;电磁单元保护避雷器元件损坏,会造成中间变压器二

次电压偏低等。

2.2 停电试验监测法

停电预试监测法,即设备停电后,通过对其进行预防性试验,达到监测其健康状况的一种方法。CVT 停电试验监测法主要包括绝缘电阻测量和电容量及介损测量、直流电阻测量 3 种,是 CVT 现场状态检修过程中判断设备良好与否的重要试验项目^[16]。

绝缘电阻测量作为常规的设备运行状态监方法主要用于故障的初步排查,是检查绝缘状态最简便和最基本的方法,绝缘电阻值的大小常能灵敏地反映绝缘情况,能有效地发现设备绝缘整体受潮、脏污,以及绝缘击穿和过热老化等缺陷。

CVT 介损测量可以更加精确有效地反映 CVT 电容单元及电磁单元的一些列缺陷,如绝缘受潮,油或浸渍物脏污、劣化变质,绝缘中有气隙放电等;CVT 电容量测量可灵活反映电容器内部浸渍剂的绝缘状况以及内部元件的连接状况。若电容量升高,说明内部元件击穿或受潮;若电容量减小,说明内部元件存在开路或缺油等现象。通过计算、分析电容值,可以指导 CVT 的更换或检修工作。

目前,现场常用的介损及电容量测量方法有多种:上节电容 C_{11} 可以采用拆除高压引线正接线方法,也可采用不拆高压引线反接线方法;下节电容 C_{12} , C_2 可采用串联法测量,也可采用自激法测量。

直流电阻测量主要是用于 CVT 电磁单元的中间变压器绕组运行状态的判断。当中间变压器一次、二次绕组出现故障后,其直流电阻值会发生明显变化,结合其他监测方法可判断具体故障类型。

2.3 红外热成像监测法

根据《带电设备红外诊断技术应用导则》,CVT 在正常运行时瓷套表面有一定发热,设备异常时整体或局部有明显发热,因而对设备定期进行红外线在线监测能够准确发现设备异常发热部位,及时排除事故隐患,有效防止和减少电气事故的发生。

若存在电容器单元或电磁单元温升过高或相间不平衡度过大时,应考虑设备是否存在缺陷。对于 CVT 可能发生故障的部位为 C_1 , C_2 分压电容器部分及电磁单元部分,其中造成电磁单元故障的原因有中间变压器一次或二次线圈短路、N 头、E 头绝缘性能降低等。若 C_1 , C_2 发生故障,流过 C_1 , C_2 电容器单元的电流值则不等,表现出两电容器单元温度上的差异。若中间变压器一次绕组发生匝间短路,流过中间变压器一次侧电流增大,电磁单元油箱温度增加,二次侧输出电流减小。若中间变压器二次绕组发生短路, CVT 二次端输出电压降低,一次电流增加,致使油箱温度升高。图 3 为某站 220 kV CVT 典型的油箱过热缺陷红外热像

图,由图可知,B 相 CVT 油箱温度明显高于 A 相、C 相,其温升约为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,而 A 相、C 相温升约为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明 B 相 CVT 油箱内部已发生故障。

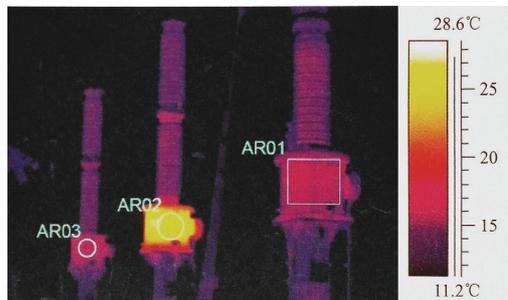


图 3 某变电站 220 kV CVT 油箱过热缺陷红外热像

红外在线监测诊断设备故障具有准确、实时、快速特征,日常维护中重视红外热成像的应用,通过定期对 CVT 进行红外监测和诊断及早发现设备的缺陷,排除事故隐患。但对 CVT 热像图的分析尚需进一步积累资料, CVT 故障点尚需结合其他相关电气试验结果综合分析确定。当电磁单元温度异常升高后,可综合分析油相关试验结果及温升、部位等情况,对缺陷的性质进行初步判定,避免盲目停电。

2.4 绝缘油色谱监测法

绝缘油里分解出的气体形成气泡,在油里对流、扩散不断地溶解在油中。这些故障气体的组成和含量与故障的类型及其严重程度密切相关。因此,绝缘油色谱分析是 CVT 状态监测的重要方法之一。表 1 为 CVT 油中溶解气体浓度的注意值,当油色谱分析的相应值达到表 1 的标准时,要引起工作人员的注意,可能存在内部放电、过热等缺陷。表 2 为 3 起不同电压等级的 CVT 电磁单元发生故障后,对其油箱中绝缘油进行色谱分析的试验数据,表 2 分别给出了 35 kV, 110 kV, 220 kV 3 种电压等级下油中溶解气体成分值,表中标记为异常数据,根据三比值法,可判断其故障结果分别为低温过热、低能放电、电弧放电。

表 1 CVT 油中溶解气体浓度注意值 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$

气体组分	含量	
	220 kV 以上	220 kV 以下
总烃	100	100
乙炔	2	3
氢	150	150

综上,根据 CVT 故障机理及监测方法,图 4 给出 CVT 故障诊断及状态监测的流程,可用于指导 CVT 日常监测及维护工作。

3 CVT 状态监测技术展望

随着大电网系统快速发展,电网建设规模也不断扩大。CVT 作为集测量、保护、通信等功能于一体的站用设备,寻找更加灵活、准确、高效的 CVT 状态监测技

表 2 CVT 油中溶解气体浓度值 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$

油中溶解气体成分	气体浓度值		
	35 kV	110 kV	220 kV
H ₂	4757	12 637	1936
CH ₄	1 145.56	5 376.5	902
C ₂ H ₆	3 756.9	4 329.6	5429
C ₂ H ₄	2 296.7	15 066.2	2885
C ₂ H ₂	0	48 024.3	2413
总烃	7 199.2	72 796.6	11 465
CO	19 850	4765	15 064
CO ₂	153 961	5127	76 736
三比值法诊断结果	低温过热	低能放电	电弧放电

注:标记部分为超标数据。

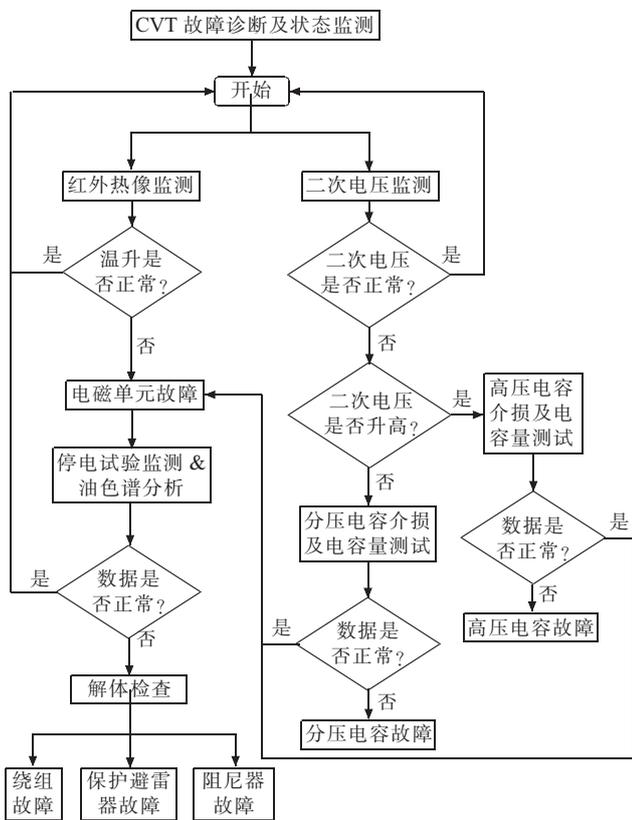


图 4 CVT 故障诊断与状态监测流程

术方法必将成为一个重要的研究方向。例如,实时监测 CVT 整体的运行功率,研究 CVT 有功损耗、无功损耗与系统运行特性之间的关系,通过对大数据的分析与研究,找到故障判据,达到评估其运行性能的目的; CVT 内部发生故障后,通常存在局部放电现象,可考虑通过局部放电检测方法对 CVT 运行状态进行评估。

CVT 在正常运行状态下,运行噪声很低,而当中间变压器故障时,油箱内部会产生幅值较大的非平稳噪声。因此,可以实时监测 CVT 的运行噪声,通过噪声分析(频谱分析、声级和声强分析)来判断其运行状况。此外,随着振动理论和测量方法的日趋成熟,振动监测技术已经成为故障诊断的基本技术之一, CVT 中间变压器故障后常常造成箱体振动加剧,故将振动监测技

术运用到 CVT 状态监测和故障诊断中,不失为一种较好的尝试。

在状态监测方面,基于大数据的人工智能、神经网络、混沌算法等在其他领域取得广泛成功的方法也越来越受到研究者的关注,未来这些理论和算法同样可以在 CV 状态监测中得到深入应用。另外,如何在故障产生前及时准确地预测可能产生的危害,提前处理故障诱因将成为另一个关注的焦点。

4 结束语

总体来讲,国内外对 CVT 的监测技术研究并不充分,精确、高效、实时的监测技术还有待进一步开发完善。文中就 CVT 国内外状态监测方法及相关的运行特性进行了总结和分析,对研究 CVT 的状态监测及故障诊断有较大的借鉴作用,对强化 CVT 运行管理及优化 CVT 生产设计有重要意义。

参考文献:

- [1] 李金宇,汲胜昌,祝令瑜. 特高压串补平台投切对电容式电压互感器影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7): 1799-1807.
- [2] 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.
- [3] 李巧燕,张金强. 一例 500 kV CVT 电压测量异常分析与处理[J]. 高压电器,2008,44(1):76-78.
- [4] 乔立凤,高敬更,温定筠. 电容式电压互感器二次电压异常分析处理[J]. 电子测量技术,2013,36(2):116-118.
- [5] 徐长海,王静君. 一起 35 kV 电容式电压互感器二次电压异常升高故障分析[J]. 江苏电机工程,2014,33(3):10-11.
- [6] 王文洪,侯慧. 220 kV 电容式电压互感器的缺陷分析和故障预防[J]. 武汉大学学报(工学版),2006,39(1):97-100.
- [7] 王志全. 110 kV 电容式电压互感器故障原因检查分析[J]. 高电压技术,2005,31(12):80-81.
- [8] MARTI J R, LINARES L R, DOMMEL H W. Current Transformers and Coupling-capacitor Voltage Transformers in Real-time Simulations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1997,12(1):164-168.
- [9] 张春燕. 几起电容式电压互感器故障分析[J]. 江苏电机工程,2012,31(3):15-17.
- [10] 李琼林,张力森,余晓鹏. 2 起 35 kV 侧 CVT 熔断器熔断故障原因探析及解决措施[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):142-146.
- [11] 梁静,吴冬文. 35 kV 电容式电压互感器电磁单元发热故障分析[J]. 江西电力,2013(2):65-68.
- [12] 陈敏维,李棣,季征南. 一例电容式电压互感器绝缘在线监测案例分析[J]. 高压电器,2012,48(5):99-104.
- [13] 邱太洪,罗容波,李国伟. 电容式电压互感器二次电压在线监测在故障检测分析中的应用[J]. 变压器,2015,52(9):70-73.
- [14] FERNANDES D, NEVES W L A, VASCONCELOS J C A, et al. Comparisons Between Lab Measurements and Digital Sim-

- [4] 车仁飞,梁军,孟昭勇.一种考虑线路参数变化的输电线路双端测距算法[J].中国电力,2004,37(2):45-49.
- [5] 梁华为,刘万顺,刘平,等.一种考虑对各种误差综合修正的线路双端测距算法[J].继电器,2005,33(17):7-10.
- [6] 刘玉萍,林圣,何文,等.动态条件下基于在线参数估计的故障定位算法[J].电力系统自动化,2013,37(13):103-108.
- [7] 赵永娟,曹小拐,刘万顺.同杆并架双回线准确参数未知时的故障测距新算法[J].电力系统自动化,2005,29(4):72-76.
- [8] 徐鹏,梁远升,王钢.同杆四回线参数自适应双端故障测距频域算法[J].电力系统自动化,2010,34(9):59-64.
- [9] 李勋,石帅军,龚庆武.采用信赖域法和双端非同步数据的故障测距算法[J].高电压技术,2010,36(2):396-400.
- [10] 索南加乐,齐军,陈福锋,等.基于R-L模型参数辨识的输电线路准确故障测距算法[J].中国电机工程学报,2004,24(12):119-125.
- [11] APOSTOLOPOULOS C A, KORRES G N. A Novel Algorithm for Locating Faults on Transposed/Untransposed Transmission Lines Without Utilizing Line Parameters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2328-2338.
- [12] VIEIRA DOUGLAS A G, OLIVEIRA DIOGO B, LISBOA ADRIANO C. A Closed-form Solution for Transmission-line Fault Location Without the Need of Terminal Synchronization or Line Parameters [J]. IEEE Transactions On Power Delivery, 2013, 28(2): 1238-1239.

作者简介:

李澄(1987),男,江苏江阴人,助理工程师,从事地区电网调控运行工作;

鲍有理(1966),男,安徽安庆人,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护技术管理工作;

黄瑜(1982),男,江苏无锡人,工程师,从事地区电网调控运行工作;

施亚萍(1972),女,江苏无锡人,技师,从事地区电网调控运行工作;

袁磊平(1974),女,江苏无锡人,技师,从事地区电网调控运行工作。

Research on Fault Location Unaffected by Parameters for Transmission Lines

LI Cheng, BAO Youli, HUANG Yu, SHI Yaping, YUAN Leiping

(State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China)

Abstract: The paper proposed a new fault location unaffected by transmission line parameters (TLPs) to eliminate the errors of the existing one caused by TLP variations. To get the new fault location, firstly the unit impedance expression is derived based on the lumped parameter circuit model and the basic principle that at faulty point voltages calculated from both terminals can be equal. Then an easy location equation is got by eliminating the unit impedance based on the sequence component method, so that the fault point can be also located when the values of TLPs are unknown. Simulation results show that the new fault location where the faulty point is solved without iteration and search is reliable, effective, and precise, and has a good practical value.

Key words: transmission line; parameters variation; lumped parameter; fault location

(上接第 66 页)

ulations for a Coupling Capacitor Voltage Transformer [C]// IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition. USA Latin, 2006:1-6.

- [15] 林浩,倪学锋,王岩.基于EMS数据的电容式电压互感器在线监测系统研究[J].电测与仪表,2015,52(4):1-7.
- [16] 王蕾云,李德超,张玉环.电容式电压互感器介损现场测量方法及误差分析[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(3):72-76.

作者简介:

陈涛涛(1989),男,江苏宿迁人,工程师,从事电气试验及故障诊断工作;

陆金(1981),男,江苏宿迁人,工程师,从事高压电力设备电气试验工作;

许小飞(1987),男,江苏如皋人,工程师,从事变电站一次设备变电检修及管理工作。

Current Status and Development of Condition Monitoring Technology for Capacitor Voltage Transformer

CHEN Taotao, LU Jin, XU Xiaofei

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Suqian 223800, China)

Abstract: Capacitor voltage transformer (CVT) is the main equipment with functions of measurement, protection, and communications in power system. The stable operation of CVT is very important to the security of grid. However the CVT's failure occurs sometimes and it needs much manpower and many resources to maintain. According to the field operation experience of CVT, it is still difficult to give the real-time, accurate and effective condition monitoring to the CVT. So the paper introduces the common failure type and mechanism of CVT's components firstly, and then describes and analyzes its existing condition monitoring methods in detail. At last, the paper gives the prospect to the development trend and direction of the condition monitoring of CVT.

Key words: CVT; condition monitoring; failure mechanism; electromagnetic unit; capacitor; dielectric loss