

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.06.010

330 kV 膜纸绝缘结构电容式电压互感器下节 电容介损异常研究

陈奕童, 刘从聪, 谭展鹏, 黎俊涛, 周佳, 林家驹

(广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523000)

摘要: 电容式电压互感器(CVT)是用于电力系统中测量、保护和计量的重要电气设备,广泛应用于110 kV及以上电压等级变电站,其绝缘状态对电力系统安稳运行有重要影响。现场试验中常以介质损耗因数($\tan \delta$)测试作为判断电容式电压互感器设备绝缘状态的依据,然而部分采用膜纸复合绝缘结构的电容式电压互感器中存在 Garton 效应(Garton effect),在10 kV及以下介损试验中有时会出现介质损耗因数偏高等异常数据,并不能反映设备的真实绝缘状态。本文针对一起330 kV膜纸绝缘电容式电压互感器下节电容器因 Garton 效应介损异常偏高现象进行分析,提出电容式电压互感器现场试验中 Garton 效应的判定与处理应对方法,为电容式电压互感器介损测量与绝缘状态判别提供了科学参考,对于维持电网运行的可靠性、提升经济效益具有重大意义。

关键词: 电容式电压互感器;膜纸绝缘;Garton 效应;介质损耗因数

Research and Discussion on Abnormal Dielectric Loss of the Lower Section Capacitor of 330 kV Film-paper Insulated CVT in a 500 kV Substation

CHEN Yitong, LIU Congcong, TAN Zhanpeng, LI Juntao, ZHOU Jia, LIN Jiaju

(Dongguan Power Supply of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Dongguan 523000, China)

Abstract: Capacitive voltage transformer (CVT) is an important electrical equipment in power system for measurement, protection and metering, and is widely used in substations at 110 kV and above. Its insulation condition has a significant impact on the stable operation of power system. In on-site tests, the dielectric loss factor ($\tan \delta$) is often used as the base for judging the insulation condition of CVT. However, in some CVT with film-paper composite insulation structure the Garton effect is existed. Sometimes, such abnormal data as high $\tan \delta$ may occur in the dielectric loss test at 10 kV and below, which cannot reflect the real insulation condition of the equipment. In this paper a case of abnormally high dielectric loss in the lower section capacitor of a 330 kV film-paper insulated CVT due to the Garton effect is analyzed, the determination and handling methods of the Garton effect in on-site tests of CVT are proposed, providing a scientific reference for the dielectric loss measurement and insulation condition judgment of CVT. This is of great significance for maintaining the operation reliability of power grid and improving economic benefits.

Keywords: capacitive voltage transformer; film - paper composite insulation structure; Garton effect; dielectric loss factor

0 引言

电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)主要由电容分压模块和中间变压器模块构成,具有耐电强度高、绝缘裕度大、运行可靠、调差精度

高等特性^[1-4],以及体积小、重量轻与造价成本相对较低等优点。CVT不仅有良好的电磁兼容性,在运行时也不会产生铁磁谐振过电压^[5],安全性高,因此广泛用于110 kV及以上电压等级变电站中,起到保护、测量和计量等作用^[6-9]。

现场试验中 CVT 常规预防性试验项目主要包括介电损耗试验^[10-16]、电容量和绝缘电阻测试^[17-23],其中介电损耗因数($\tan\delta$)和电容量主要通过 10 kV 及以下的介电损耗试验进行测量。然而由于 Garton 效应的存在,部分采用膜纸绝缘结构的 CVT 电容单元在 10 kV 及以下介电损耗试验中有时会出现 $\tan\delta$ 偏高等异常数据,并不能反映设备的真实绝缘状态^[24-25],容易造成对设备状态的误判^[26-27]。

东莞供电局某 500 kV 变电站—330 kV CVT 备品在现场自激法试验中,发现下节电容器 C_{13} 的 $\tan\delta$ 超标,进行现场诊断试验、返厂试验与解体研究后,发现其介损异常主要是膜纸绝缘结构存在 Garton 效应导致的。本文通过对该 CVT 下节电容器介损异常情况的排查试验,深入解析 Garton 效应对 CVT 介损测量的影响规律,提出在 CVT 现场试验中 Garton 效应的判定与处理应对方法,为 CVT 介损测量与绝缘状况判别提供了新的参考依据,对于维持电网运行的可靠性、提升经济效益具有重大意义。

1 试验设备

试验设备为某站一台 330 kV 电容式电压互感器备品,型号为 330/ $\sqrt{3}$ -0.005W3,生产日期为 2021 年 7 月,额定一次电压为 330/ $\sqrt{3}$ kV,额定电容为 5 000 pF。现场进行介电损耗试验时发现,该设备自激法 2 kV 测量下节电容器 C_{13} 的 $\tan\delta$ 为 0.248%,超出《电力设备检修试验规程》(DL/T 596—2021)中对膜纸绝缘电容器要求的 0.2%,其余试验结果无异常。将设备返回厂家进行试验和解体,进一步探究其中原因。被试电容式电压互感器电容单元结构示意图见图 1。

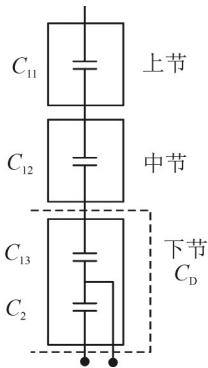


图1 被试电容式电压互感器电容单元结构示意图
Fig.1 Capacitor unit schematic diagram of tested CVT

2 CVT介损试验中 Garton 效应的影响

2.1 现场试验

2.1.1 反接法试验

现场对下节电容器进行反接法试验,试验电压

依次从 2 kV 升至 10 kV,试验结果如表 1 和图 2 所示。从表 1 和图 2 中可以发现在试验电压升至 4 kV 时,下节电容器 C_{13} 的 $\tan\delta$ 为 0.187%,已经满足不超过 0.2% 的要求,并且 C_{13} 的 $\tan\delta$ 随着试验电压升高而下降,在试验电压达到 10 kV 时, C_{13} 的 $\tan\delta$ 仅有 0.095%。

表1 现场反接法试验 C_{13} 介损
Table 1 C_{13} dielectric loss of reverse connection test at site

试验电压/kV	$\tan\delta/\%$
2	0.249
3	0.216
4	0.187
5	0.165
6	0.148
7	0.133
8	0.122
9	0.112
10	0.095

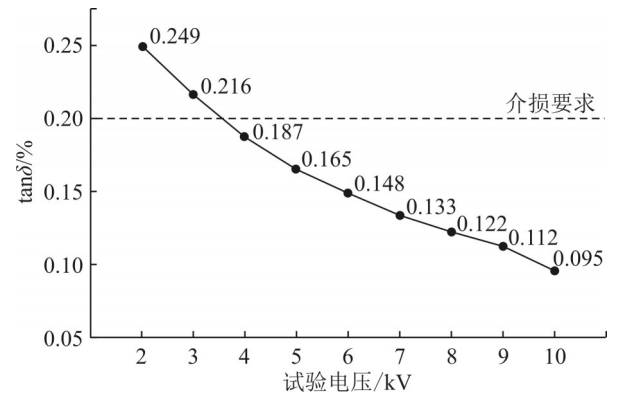


图2 现场反接法试验 C_{13} 的 $\tan\delta$
Fig.2 $\tan\delta$ of C_{13} dielectric loss of reverse connection test at site

2.1.2 自激法试验

对下节电容器进行整体施加 50 kV 工频电压前后 2 kV 和 4 kV 下的自激法试验,试验结果如表 2 所示。从表 2 中可以看到,在施加 50 kV 工频电压前, C_{13} 自激法 2 kV 时的 $\tan\delta$ 为 0.235%,不满足 $\tan\delta$ 小于 0.2% 的要求,而在将电压提升至 4 kV 时, C_{13} 的 $\tan\delta$ 降至 0.181%,满足要求。施加工频电压后, C_{13} 自激法 2 kV 和 4 kV 的 $\tan\delta$ 分别为 0.125% 和 0.128%,自激法 $\tan\delta$ 合格。因此,提高试验电压或对上节电容器施加高压后再进行试验可以明显降低 C_{13} 自激法 $\tan\delta$ 大小。

表2 施加 50 kV 工频电压前后自激法试验结果
Table 2 Self exciation method test result before and after applying 50 kV power frequency voltage

试验电压/kV	耐压前		耐压后	
	2	4	2	4
C_{13}	0.235	0.181	0.125	0.128
C_2	0.100	0.077	0.083	0.073

2.2 返厂试验

2.2.1 不同停电时长的介损测量

对返厂的下节电容器施加额定电压 63.5 kV 保持 6 h 后去除一次电压以模拟停电状态,随后每间隔 0.5 h,使用 AI-6000 精密介损电桥对 C_{13} 和 C_2 进行一次自激法 2 kV 时的 $\tan\delta$ 测量,检测不同停电时长下的电容量和 $\tan\delta$ 变化,试验结果如表 3 和图 3 所示。

表 3 不同停电时长下 C_{13} 与 C_2 的电容量和 $\tan\delta$ 变化
Table 3 Capacitance of C_{13} and C_2 as well as $\tan\delta$ variation under different power off duration

停电 时长/h	C_{13}		C_2	
	电容量/nF	$\tan\delta/\%$	电容量/nF	$\tan\delta/\%$
0	17.69	0.061	96.17	0.081
0.5	17.70	0.084	96.21	0.088
1.0	17.70	0.099	96.25	0.092
1.5	17.70	0.113	96.31	0.095
2.0	17.70	0.123	96.30	0.095
2.5	17.70	0.133	96.21	0.099
3.0	17.70	0.141	96.24	0.101
3.5	17.70	0.148	96.17	0.105
4.0	17.71	0.152	96.16	0.111
4.5	17.71	0.160	96.27	0.118
5.0	17.71	0.165	96.24	0.127
5.5	17.71	0.168	96.31	0.134
6.0	17.71	0.173	96.31	0.136
6.5	17.71	0.175	96.22	0.137
7.0	17.71	0.177	96.31	0.136
7.5	17.71	0.179	96.31	0.135
8.0	17.72	0.181	96.37	0.135
8.5	17.72	0.183	96.34	0.136
9.0	17.72	0.187	96.23	0.136
9.5	17.72	0.187	96.28	0.136
10.0	17.72	0.188	96.31	0.132
10.5	17.72	0.189	96.34	0.132
11.0	17.72	0.190	96.39	0.131
11.5	17.72	0.193	96.32	0.131
12.0	17.72	0.194	96.42	0.130
12.5	17.72	0.195	96.41	0.130
13.0	17.73	0.196	96.28	0.129
13.5	17.73	0.197	96.32	0.129
14.0	17.73	0.198	96.28	0.128
14.5	17.73	0.198	96.36	0.128
15.0	17.73	0.200	96.32	0.127
15.5	17.73	0.202	96.38	0.126
16.0	17.73	0.204	96.36	0.128
16.5	17.73	0.205	96.36	0.125

从图 3 中可以看到,停电后马上进行自激法试验时,下节电容器 C_{13} 和 C_2 的 $\tan\delta$ 分别为 0.061% 和 0.081%,此后每 0.5 h 相同方法下测得的 $\tan\delta$ 随时间逐渐增大,停电 6 h 内增长速度较快,停电 6 h 时 C_{13} 和 C_2 的 $\tan\delta$ 已分别达到 0.173% 和 0.136%,此后 C_2 的 $\tan\delta$ 变化较小,而 C_{13} 的 $\tan\delta$ 缓慢增长,

在停电 15 h 时 C_{13} 的 $\tan\delta$ 为 0.200%,达到要求上限,停电 15 h 后 $\tan\delta$ 超过 0.2%,不符合要求。另一方面,电容量全程变化不大,停电时间几乎没有影响。

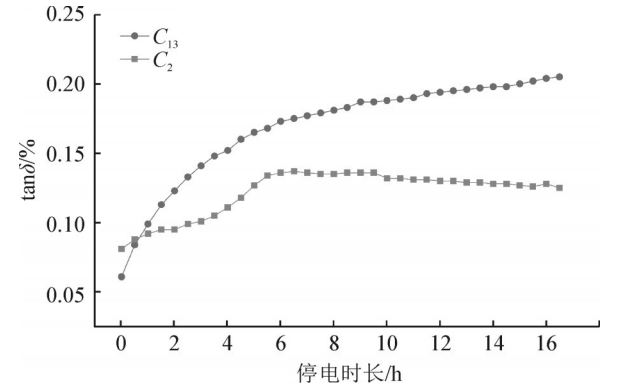


图 3 不同停电时长下 C_{13} 与 C_2 的电容量和 $\tan\delta$ 变化
Fig. 3 Capacitance of C_{13} and C_2 as well as $\tan\delta$ variation under different power off duration

停电 16.5 h 后,在自激法试验结束后使用 AI-6 000 精密介损电桥对下节电容器进行反接法 10 kV 的介质损耗试验, C_{13} 电容量和 $\tan\delta$ 分别为 17.75 nF 和 0.101%,与现场反接法试验结果相近。

2.2.2 不同电压下的电容量和 $\tan\delta$ 测量

将下节电容器从电磁单元上移下来,在进行工频耐受电压试验与局部放电量测量前后分别使用高压电桥对 C_{13} 与下节整体 C_D 进行不同电压下的电容量和 $\tan\delta$ 测量,结果如图 4 和表 4 所示。

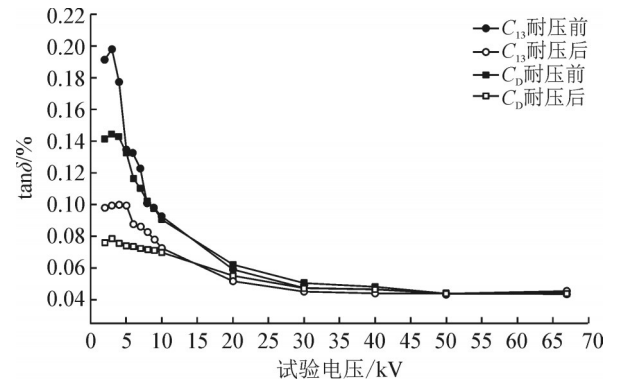


图 4 工频耐压前后不同试验电压下 C_{13} 与下节整体 C_D 电容量与 $\tan\delta$ 变化图
Fig. 4 Capacitance of C_{13} and lower section integral C_D as well as $\tan\delta$ variation before and after withstanding voltage

从图 4 中可以看到,耐压试验前,2 kV 时 C_{13} 的 $\tan\delta$ 为 0.191%,小于要求的 0.2%,且 C_{13} 的 $\tan\delta$ 随着试验电压升高而呈现下降趋势,试验电压 20 kV 时 $\tan\delta$ 为 0.059%,相比试验电压 2 kV 时的 $\tan\delta$ 降幅约 70%。试验电压 20 kV 后 $\tan\delta$ 下降速度放缓,最终 67 kV 时 $\tan\delta$ 仅有 0.044%。耐压后, C_{13} 与 C_D 整节各个试验电压下的 $\tan\delta$ 均有明显下降,2 kV 时 C_{13} 的 $\tan\delta$ 为 0.098%,相比耐压前下降约 50%。在

表4 工频耐压前后不同试验电压下C₁₃与下节整体C₀电容量与tanδ变化
Table 4 Capacitance of C₁₃ and lower section integral C₀ as well as tanδ information before and after withstanding voltage

试验 电压/kV	C ₁₃				下节整体C ₀			
	耐压前		耐压后		耐压前		耐压后	
	电容量/nF	tanδ/%	电容量/nF	tanδ/%	电容量/nF	tanδ/%	电容量/nF	tanδ/%
2	17.80	0.191	17.78	0.098	15.02	0.141	15.01	0.076
3	17.80	0.198	17.78	0.099	15.02	0.144	15.01	0.078
4	17.79	0.177	17.78	0.100	15.02	0.143	15.01	0.076
5	17.79	0.134	17.78	0.099	15.02	0.132	15.01	0.074
6	17.79	0.133	17.78	0.088	15.02	0.116	15.01	0.074
7	17.79	0.123	17.78	0.086	15.02	0.110	15.01	0.073
8	17.79	0.101	17.78	0.083	15.02	0.102	15.01	0.072
9	17.78	0.098	17.78	0.078	15.01	0.097	15.01	0.071
10	17.78	0.092	17.78	0.073	15.01	0.091	15.01	0.070
20	17.77	0.059	17.77	0.052	15.01	0.062	15.01	0.055
30	17.78	0.048	17.77	0.045	15.01	0.051	15.00	0.048
40	17.77	0.046	17.77	0.044	15.00	0.048	15.00	0.046
50	17.77	0.044	17.77	0.044	15.00	0.044	15.00	0.045
67	17.77	0.044	17.77	0.046	15.00	0.044	15.00	0.045

试验电压达 20 kV 后 C₁₃ 的 tanδ 与耐压前相差不大,试验电压 67 kV 时的 tanδ 则与耐压前几乎一致。电容量变化不大。

在工频耐受电压试验与局部放电量测量中,179 kV 工频耐受电压 60 s 试验通过。127 kV 和 88 kV 时局部放电量分别为 2.7 pC 和 0.3 pC,满足≤ 10 pC 与 ≤5 pC 的要求,试验合格。

2.2.3 电容器油试验

对下节电容器和中节电容器的有机合成绝缘油进行含水量、油耐压、油色谱和颗粒度试验,结果如表 5 所示。可以看到,根据厂家要求,电容器油中含水量、油耐压和油色谱结果均合格,两节电容器均无内部放电。

表5 电容器油试验结果
Table 5 Test result of capacitor oil

参数	数值	
	中节电容器	下节电容器
含水量/(mg/L)	9.3	9.6
油耐压/kV	60.3	62.9
油色谱数据/ (μL/L)	H ₂	18.14
	CH ₄	4.12
	C ₂ H ₄	0.18
	C ₂ H ₆	0.61
	C ₂ H ₂	0
	C ₁ +C ₂	4.91
	CO	42
	CO ₂	274
油液颗粒度/ 个	2 μm	16 718
	5 μm	4 138
	15 μm	351
	25 μm	25
	100 μm	0

2.2.4 电容器解体检查

对下节电容器和中节电容器进行解体检查,将电容心子从套管中取出,如图 5-6 所示,该电容器主要由电容心子与外包的纸板组成。

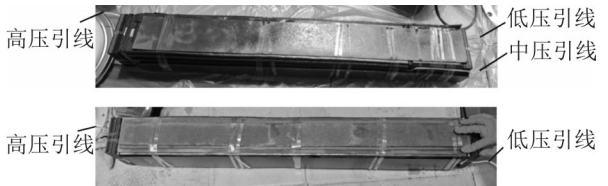


图5 下节电容器(上)与中节电容器(下)内的电容心子(含外包纸板)
Fig. 5 Capacitor cores of the lower capacitor (upper) and middle capacitor (lower) (including outer cardboard)

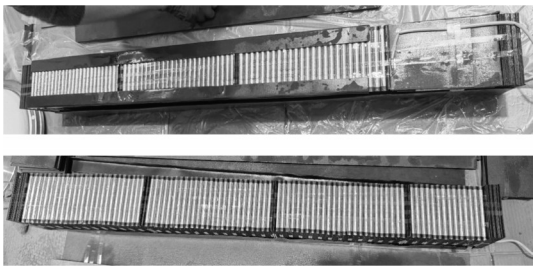


图6 下节电容器(上)与中节电容器(下)内的电容心子(去除外包纸板)
Fig. 6 Capacitor cores of the lower capacitor (upper) and middle capacitor (lower) (excluding outer cardboard)

检查发现电容心子形状完好,无变形或击穿,电容器油清澈,但在电容心子高压引线的铜箔表面,观测到细小的颗粒状物质,如图 7 所示。同时根据电容器生产日期对包裹电容心子的纸板进行排查,此批纸板均满足国标要求。对电容心子进一步拆解,检查得电容元件与电容元件小包完好无异常。对比下节电容器和中节电容器的解体情况,两

节电容器的电容心子和电容元件结构相同,解体检查两节电容器未见明显差异。

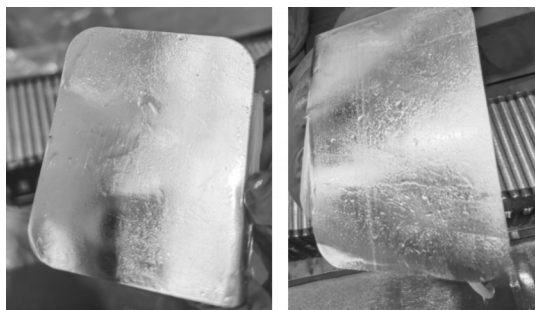


图7 下节电容器(左)与中节电容器(右)电容心子高压引线的铜箔表面

Fig. 7 Copper foil surface of capacitor core of the lower capacitor (left) and middle capacitor (right)

2.3 结果与讨论

从上文可以看到,现场试验时,在对下节电容器的介质损耗试验中发现,无论是反接法或自激法, C_{13} 与 C_2 的 $\tan\delta$ 均随着试验电压的升高而下降,说明试验电压的大小会对测得的 $\tan\delta$ 产生影响。随后对下节电容器整体进行50 kV工频耐压后再进行自激法,发现测得的 $\tan\delta$ 相比耐压前有了大幅下降,是否施加耐压、停电时间长短也会影响 $\tan\delta$ 大小。基于该CVT结构,初步分析认为是在介质损耗试验过程中产生的Garton效应导致了这种现象的发生。

Garton效应是1940年由英国电气工程师M.Garton发现的一种现象,即在含有纸的绝缘介质(或塑料及油的混合介质)中,较低电压下介质损耗角的正切值($\tan\delta$)变化比在较高电压下的值高1~10倍^[14-16]。Garton效应形成的原因是油中胶体型带电粒子在交流电场作用下的运动会受到纸纤维阻拦,且这种阻拦有随电场强度增加而减小的规律。因此在较低电压下,介质中的胶体型粒子游离于介质空间,极化损耗较大,导致介损偏高。而在较高电压下,这些胶体型粒子在较强的电场作用下集中于电极两端,介质空间中的杂质减少, $\tan\delta$ 降低^[17-20]。

本次试验的CVT电容器元件极间采用聚丙烯膜与电容器纸复合介质,电容元件外包有绝缘纸板,而电容器纸和纸板内部有纤维杂质(由纸的本身材质决定)。另一方面电容器油为有机合成绝缘油,绝缘油容易溶解少量纤维杂质,具备发生Garton效应的条件^[20-23]。

返厂试验中,对不同试验电压下的电容器 $\tan\delta$ 进行测量,发现电容器耐压前后的 $\tan\delta$ 都随试验电压的升高呈下降趋势,可以认为在高电压下绝缘油中溶解的少量纤维杂质在强电场作用下集中于电极两端,不再游离于绝缘油中,使得 $\tan\delta$ 结果降

低。解体检查时电容心子高压引线铜箔表面观测到的细小颗粒状物质也佐证了这一点。

在耐压前后与停电时长对 $\tan\delta$ 影响的试验中发现,耐压后电容器 $\tan\delta$ 明显降低,且 $\tan\delta$ 随着停电时长增加而上升,说明在高电压电场作用下Garton效应减弱, $\tan\delta$ 较小,与以往研究结果一致^[24]。而随着停电时长增加,被强电场作用集中于电极两端的纤维杂质重新游离于绝缘油中,导致 $\tan\delta$ 随着停电时长增加而上升。

综上所述,造成该CVT下节电容器介质损耗试验 $\tan\delta$ 偏高主要是因为电容器油是特殊的有机合成绝缘油,纸和纸板中纤维溶解在油中产生的Garton效应导致的,而在实际运行状态下 $\tan\delta$ 合格。为降低Garton效应的影响,一方面在电容器结构中可以减少电容心子四周绝缘纸板用量以降低纸板纤维引起的Garton效应对电容器 $\tan\delta$ 的影响。另一方面,在类似的CVT进行停电检修时,介质损耗试验应在停电后立刻进行以获取准确结果,减少不必要的人力物力浪费,提高经济性^[25]。在其他试验项目合格,仅自激法2 kV时的 $\tan\delta$ 不符合要求时,可以通过较高试验电压的10 kV反接法等方法测量 $\tan\delta$ 。若仍不合要求,可以对电容器单元整体施加额定初级电压 U_{pr} 持续15 min,然后立即进行自激法2 kV介质损耗试验,试验合格则产品可正常运行。

3 结语

1)膜纸绝缘结构CVT电容单元存在Garton效应。由于电容单元中纸和纸板内部的纤维杂质溶解于电容器油中,较低电压下会因为产生Garton效应导致 $\tan\delta$ 结果偏高。

2)膜纸绝缘结构CVT介质损耗试验应在停电立刻进行,减少Garton效应的影响以获取准确结果。

3)膜纸绝缘CVT电容单元低电压 $\tan\delta$ 偏高时,可以采取提高试验电压、使用如10 kV反接法、高压介损测试等较高试验电压的其他方法,以及先对被试电容单元施加高电压后再进行低电压介质损耗试验等方法,若 $\tan\delta$ 明显下降且符合标准要求值,则可以认为发生了Garton效应,产品试验合格。

综上所述,精准判断和处理因Garton效应引发的CVT绝缘问题,深入把握Garton效应对CVT介质损耗试验的影响规律,减少不必要的设备检修,对于维持电网运行的可靠性、提升经济效益具有重大意义。

参考文献

- [1] 童涛,徐碧川,袁思凡,等.一起电容式电压互感器二次电压异常事故分析[J].电瓷避雷器,2022(2):98-104.

- TONG Tao, XU Bichuan, YUAN Sifan, et al. A CVT secondary voltage abnormal accident[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2):98-104.
- [2] 郭亮,李哲,李骁,等.雷电过电压引发电容式电压互感器铁磁谐振特性分析与防护研究[J].电瓷避雷器,2019(6):147-151.
- GUO Liang, LI Zhe, LI Xiao, et al. Analysis and prevention research of ferroresonance in capacitor voltage transformer caused by lightning overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6):147-151.
- [3] 刘佳鑫,郎业兴,韦德福,等.500 kV 电容式电压互感器过热异常诊断分析[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(6):66-70.
- LIU Jiaxin, LANG Yexing, WEI Defu, et al. Diagnosis and analysis of abnormal overheating of 500 kV capacitance voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6):66-70.
- [4] 赵铁羽.220 kV 电容式电压互感器介损试验不拆线测量方法误差分析[J].变压器,2019,56(8):57-59.
- ZHAO Tieyu. Error analysis of 220 kV capacitor voltage transformer dielectric loss test without disconnecting measurement method[J]. Transformer, 2019, 56(8):57-59.
- [5] 房金兰.关于电容式电压互感器技术发展的探讨[J].电力电容器与无功补偿,2013,34(1):1-6.
- FANG Jinlan. Discussion on technical development of capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(1):1-6.
- [6] 凌子恕.高压互感器技术手册[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [7] 王欢,周峰,冯凌,等.电场对电容式电压互感器误差影响机理分析及验证研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(1):88-94.
- WANG Huan, ZHOU Feng, FENG Ling, et al. Analysis and verification study on influence of electrical field on CVT's error[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1):88-94.
- [8] 王玲,冯宇,杨柳,等.电容式电压互感器谐波测量方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(1):95-100.
- WANG Ling, FENG Yu, YANG Liu, et al. Study on harmonic measurement method of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1):95-100.
- [9] 杜林,李永森,贺鹏,等.环境温度对CVT计量误差的影响[J].电力自动化设备,2020,40(6):204-209.
- DU Lin, LI Yongsen, HE Peng, et al. Influence of ambient temperature on CVT's measurement error[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6):204-209.
- [10] 王欢,王忠东,卢树峰,等.基于误差状态模糊分析的电容式电压互感器内绝缘状态评价方法[J].电测与仪表,2024, 61(4):73-80.
- WANG Huan, WANG Zhongdong, LU Shufeng, et al. Internal insulation condition evaluation method for capacitor voltage transformer based on fuzzy analysis of error condition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4):73-80.
- [11] 吴奇松,夏君宇,赵国庆,等.CVT 电容分压器末端放电故障分析[J].变压器,2024,61(1):62-65.
- WU Qisong, XIA Junyu, ZHAO Guoqing, et al. Analysis of discharge fault at end screen of CVT capacitor voltage divider[J]. Transformer, 2024, 61(1):62-65.
- [12] 陈介夫,孙昊,李刚,等.基于激光诱导等离子体的 Mach-Zehnder干涉法测量气体介质恢复特性的研究[J].高压电器,2024,60(12):199-205.
- CHEN Jie fu, SUN Hao, LI Gang, et al. Research on gaseous medium recovery characteristics measurement by Mach-Zehnder interferometry based on laser-induced plasma[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12):199-205.
- [13] 林谔兴,王扬程,陈志鹏,等.气体介质影响下梅花触头载流磨损特性与电接触寿命预测[J].电力工程技术,2023,42(6):197-205.
- LIN Rongxing, WANG Yangcheng, CHEN Zhipeng, et al. Current-carrying friction characteristics and electrical contact life prediction of plum blossom contacts under the influence of gas medium[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6):197-205.
- [14] 杨硕亮,任春阳,赵含,等.天然酯绝缘油与电容式电压互感器的相容性研究[J].变压器,2024,61(7):42-46.
- YANG Shuoliang, REN Chunyang, ZHAO Han, et al. Study on compatibility between natural ester insulating oil and capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2024, 61(7):42-46.
- [15] 赵睿,景瑞斌,赵龙,等.绝缘介质理化特性辅助油浸式电抗器故障定位及诊断[J].变压器,2023,60(4):62-66.
- ZHAO Rui, JING Ruibin, ZHAO Long, et al. Physical and chemical characteristics of insulating medium assist fault location and diagnosis of oil-immersed reactor[J]. Transformer, 2023, 60(4):62-66.
- [16] 马高权,周娜,谢蒙飞,等.基于GWO-KELM模型的变压器油纸套管典型绝缘故障辨识方法[J].电网与清洁能源,2023,39(5):38-48.
- MA Gaoquan, ZHOU Na, XIE Mengfei, et al. A typical insulation fault identification method of the transformer oil-paper bushing based on the GWO-KELM model[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5):38-48.
- [17] 刘坤雄,张小庆,赵铭,等.基于CVT宽频传递模型的杂散电容分步辨识方法[J].高压电器,2023,59(12):55-62.
- LIU Kunxiong, ZHANG Xiaoqing, ZHAO Ming, et al. Step-wise identification method of stray capacitance based on

- wideband transfer model of CVT[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 55-62.
- [18] 孙红梅, 张凯, 马瑾, 等. 500 kV 变压器本体介质损耗因数温度换算研究[J]. 东北电力技术, 2023, 44(4): 30-32.
SUN Hongmei, ZHANG Kai, MA Jin, et al. Research on temperature conversion of dielectric loss factor of 500 kV transformer[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(4): 30-32.
- [19] 何聪, 张炜, 李良书, 等. 交流叠加冲击电压下环氧绝缘内部气隙局部放电特性[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 33-39.
HE Cong, ZHANG Wei, LI Liangshu, et al. PD characteristics of void in epoxy insulation under AC and impulse superimposed voltage[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 33-39.
- [20] 李博文, 贺达, 杨智, 等. CVT 铁磁谐振过电压的抑制与不同故障下二次电压特征分析[J]. 浙江电力, 2023, 42(7): 38-46.
LI Bowen, HE Da, YANG Zhi, et al. Suppression of ferromagnetic resonance overvoltage in CVT and feature analysis of secondary voltage under different faults[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(7): 38-46.
- [21] 张凯煜, 沈云超, 郭全军, 等. 一起 500 kV 电容式电压互感器电压异常事件的分析与处理[J]. 变压器, 2023, 60(8): 65-70.
ZHANG Kaiyu, SHEN Yunchao, GUO Qianjun, et al. Analysis and treatment of an abnormal voltage event of 500 kV capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2023, 60(8): 65-70.
- [22] 陈璐, 李光茂, 张梦慧, 等. 一起 110 kV 电容式电压互感器异响原因分析[J]. 变压器, 2023, 60(12): 68-72.
CHEN Lu, LI Guangmao, ZHANG Menghui, et al. Cause analysis of abnormal noise of a 110 kV capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2023, 60(12): 68-72.
- [23] 方文睿, 唐雄民, 江天鸿, 等. 脉冲激励下介质阻挡放电负载的特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 171-178.
FANG Wenrui, TANG Xiongmin, JIANG Tianhong, et al. Research on characteristics of dielectric barrier discharge load under pulse excitation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 171-178.
- [24] 徐鹏, 赵文翰, 盛智蕾, 等. Garton 效应对介损测试的影响及对策[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 118-122.
XU Peng, ZHAO Wenhan, SHENG Zhilei, et al. Influence and countermeasures of Garton effect on the measurement of dielectric loss test[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 118-122.
- [25] 沈曼盛, 周路遥, 詹江杨, 等. 断路器并联电容介质损耗超标分析[J]. 浙江电力, 2018, 37(12): 82-85.
SHEN Mansheng, ZHOU Luyao, ZHAN Jiangyang, et al. Analysis on exceeded dielectric loss of shunt capacitor in circuit breaker[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(12): 82-85.
- [26] 王少华, 方玉群. Garton 效应及其对容性设备高压介损测量的影响[J]. 电工电气, 2011(9): 51-53.
WANG Shaohua, FANG Yuqun. Garton effect and its influence on high-voltage dielectric loss measurement for capacitive equipment[J]. Electrotechnics Electric, 2011(9): 51-53.
- [27] 何文志. Garton 效应对套管介损测量的影响[J]. 电气技术, 2014(1): 65-67.
HE Wenzhi. Analysis of the influence of Garton effect on bushing dielectric loss measurement[J]. Electrical Engineering, 2014(1): 65-67.
- [28] 王冰, 李学斌, 康激扬, 等. 220 kV 电容式电压互感器过热故障原因分析[J]. 东北电力技术, 2015, 36(5): 27-29.
WANG Bing, LI Xuebin, KANG Jiyang, et al. Cause analysis of 220 kV capacitor voltage transformer overheating[J]. Northeast Electric Power Technology, 2015, 36(5): 27-29.
- [29] 杨洋, 许强, 陈安明, 等. 某 500 kV 开关断口间并联电容器的高压介损诊断及分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(5): 64-67.
YANG Yang, XU Qiang, CHEN Anming, et al. High voltage dielectric loss diagnosis and analysis of shunt capacitors between breaks of 500 kV circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(5): 64-67.
- [30] 左文启, 汪倩, 谢励耘, 等. Garton 效应对膜纸复合绝缘电容器介损测量值的影响及对策[J]. 绝缘材料, 2010, 43(1): 71-74.
ZUO Wenqi, WANG Qian, XIE Liyun, et al. Influence of Garton effect on the measurement values of dielectric loss of film-paper composite dielectric capacitor and some counter measures[J]. Insulating Materials, 2010, 43(1): 71-74.
- [31] 杨贤, 马志钦, 付一丁, 等. Garton 效应对电容式电压互感器介损测量影响研究[J]. 变压器, 2018, 55(5): 52-55.
YANG Xian, MA Zhiqin, FU Yiding, et al. Influence of Garton effect on dielectric loss measurement of capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2018, 55(5): 52-55.
- [32] 姜雄伟, 金涌涛, 韩睿, 等. 热老化下双层聚酯薄膜空间电荷特性的试验与数值仿真研究[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 61-68.
JIANG Xiongwei, JIN Yongtao, HAN Rui, et al. Research on test and numerical simulation of space charge characteristics of double layer thermally aged polyester film[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 61-68.
- [33] 何杰, 吕永红, 王四保, 等. 500 kV 断路器均压电容器介质损耗超标分析[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 34-37.

- HE Jie, LYU Yonghong, WANG Sibao, et al. Studies on hyper-scaling dielectric loss of grading capacitors of 500 kV breakers[J]. Electric Power, 2011, 44(5): 34-37.
- [34] 文峰, 谭宁. 某变电站 500 kV 均压电容器介质损耗超标分析[J]. 贵州电力技术, 2014, 17(10): 53-54.
- WEN Feng, TAN Ning. The analysis of a substation 500 kV equalizing capacitor dielectric loss exceed the standard[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2014, 17(10): 53-54.
- [35] 高燃, 胡武炎, 吴胜, 等. 一起 500 kV 断路器用均压电容器缺陷的综合分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(5): 66-69.
- GAO Ran, HU Wuyan, WU Sheng, et al. Comprehensive analysis on defects of grading capacitor for 500 kV circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 66-69.
- [36] BARTNIKAS R. Dielectric loss in insulating liquids[J]. IEEE Trans, Electrical Insulation, 1967, 2(1): 33-54.
- [37] 张国豪, 李化, 林福昌, 等. 金属化聚丙烯膜电容器自愈产气特性与保护技术[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 197-202.
- ZHANG Guohao, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on self-healing gas generation characteristics and protection technology of metallized polypropylene film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 197-202.
- [38] GARTON G G. Dielectric loss in thin films of insulating liquids[J]. Journal of IEE, 1947, 88(23): 23-40.
- [39] 许培俊, 韦会逆, 何运华, 等. 基于超疏水滤膜的绝缘油多级过滤除水新工艺[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 207-213.
- XU Peijun, WEI Huini, HE Yunhua, et al. New technology of multi-stage filtration of water removal of insulating oil based on super-hydrophobic filter membrane[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 207-213.
- 作者简介:
- 陈奕童(1998—), 男, 助理工程师, 主要从事高压试验相关工作。E-mail: 1357319532@qq.com。
- 刘从聪(1992—), 工程师, 从事高电压与试验方面的工作。E-mail: liucongcong@dg.gd.csg.cn。
- 谭展鹏(1995—), 主要从事高压试验领域相关工作。E-mail: tanzhanpeng@dg.gd.csg.cn。
- 黎俊涛(1990—), 工程师, 主要从事高压试验领域相关工作。E-mail: lijuntao@dg.gd.csg.cn。
- 周佳(1990—), 工程师, 从事高电压与试验方面的研究工作。E-mail: 799752561@qq.com。
- 林家驹(1996—), 助理工程师, 从事电力设备运维及新技术应用工作。E-mail: 1416218843@qq.com。

《电力电容器与无功补偿》2025 年 6 期广告单位

1 上海思源电力电容器有限公司	封面	12 杭州精诚电力设备有限公司	前插 8
2 山东哈大电气有限公司	封二	13 日新电机(无锡)有限公司	前插 9
3 节约水资源公益广告	封三	14 陕西泰普瑞电工技术有限公司	前插 10
4 西安高压电器研究院股份有限公司(业务)	封底	15 西安金叶电力科技有限公司	前插 11
5 深圳市紫宸激光设备有限公司	前插 1	16 陕西凯瑞宏星电器有限公司	前插 12
6 宁国市裕华电器有限公司	前插 2	17 深圳市三和电力科技有限公司	前插 13
7 东莞市东和电子制程有限公司	前插 3	18 桂林明富金属股份有限公司	前插 14
8 赛晶科技集团有限公司	前插 4	19 西安高压电器研究院股份有限公司(认证中心)	
9 温州市凯泰特种电器有限公司	前插 5		前插 15
10 山东海源泰和电气有限公司	前插 6	20 西安唯实输配电技术有限公司	前插 16
11 新程(辽宁)电力电容器科技有限公司	前插 7		