

换流变压器现场交接试验绝缘电阻问题 处理方法研究

鲁翔¹, 李成顺², 张旭晶³

(1. 中国南方电网超高压输电公司, 广州 510620; 2. 特变电工沈阳变压器集团有限公司, 沈阳 110144;
3. 广西送变电建设有限公司, 南宁 530031)

摘要: [目的]换流变压器是制约整个换流站工程建设进度最为关键的设备, 换流变压器现场交接试验中绝缘电阻测试不合格问题经常出现, 对工程建设进度造成较大影响, 若未处理合格可能会对日后运行埋下安全隐患。[方法]对某特高压直流工程4台高端换流变压器绝缘电阻测试不合格问题详细分析了原因, 排查了造成指标不合格各种因素, 研究制定了综合处理方案并开展实际验证。[结果]结果表明: 可根据不同情况, 分轻重缓急, 采取降低绝缘油介损值或低频负载短路电流加热或整体更换绝缘油的处理方法对处理绝缘电阻问题效果较好。[结论]研究成果可为其它工程类似问题提供处理思路和方法, 在保证质量的同时最大限度减少对工程进度的影响。

关键词: 换流变压器; 交接试验; 绝缘电阻值; 介损; 低频负载短路电流加热; 工程进度

中图分类号: TM7; TM855

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0077-05

Research on the Treatment Method of Insulation Resistance in the Field Test of Commutation Transformer

LU Xiang¹, LI Chengshun², ZHANG Xujing³

(1. EHV Transmission Companies of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;
2. TBEA Shenyang Transformer Group Co., Ltd., Shenyang, 110144, China;
3. Guangxi Transmission and Substation Construction Co., Ltd., Nanning 530031, China)

Abstract: [Introduction] Converter transformer is the most critical equipment that restricts the construction progress of the whole converter station project. The insulation resistance test of converter transformer is often unqualified in the field transfer test, which has a great impact on the construction progress of the project. If not qualified, it may bury the hidden trouble of safe operation in the future operation. [Method] The causes of nonconformity of insulation resistance test of 4 high-end converter transformers in an UHVDC project were analyzed in detail, various factors causing nonconformity of indexes are investigated, a comprehensive treatment scheme was developed and practical verification was carried out. [Result] The results show that according to different conditions, the method of reducing the dielectric loss of insulating oil or heating with low frequency load short circuit current or replacing insulation oil as a whole can be used to deal with the insulation resistance problem. [Conclusion] This paper can provide some ideas and methods for other similar engineering problems, which can ensure the quality and minimize the influence on the progress of the project.

Key words: converter transformer; commissioning test; insulation resistance value; dielectric loss; low frequency load short circuit current heating; project progress

西电东送是国家的重要能源战略, 是南方电网公司的主责主业, (特)超高压直流输电工程作为西电网东送重要主通道, 肩负防止大气污染、消纳云

南水电、满足两广地区日益增长的负荷需求重任, “十二五”、“十三五”期间, 南方电网先后建成了“±800 kV 云广直流工程”、“±800 kV 糯扎渡至广东直流工程”、“±500 kV 溪洛渡至广东同塔双回直流工程”、“±500 kV 金中直流工程”、“鲁西背靠背异步联网工程”、“±800 kV 滇西北至广东直流工程”, 在建的还有“±800 kV 乌东德电站送广

收稿日期: 2018-08-31 修回日期: 2018-10-09

基金项目: 滇西北至广东特高压直流输电工程项目资助(010000WS25140001)

东广西直流工程”。

换流变压器作为(特)超高压直流工程换流站主设备,连接在换流阀与交流系统之间,实现换流阀与交流母线的连接,通过电磁耦合在两侧绕组之间传递能量,可为换流器提供换相电压。换流变压器在交直流复杂电场环境下运行,对其内外绝缘、载流能力、热稳定及抗短路能力要求极高,内部结构复杂,制造难度大、周期长、造价高,是(特)超高压直流输电工程换流站最为重要的主设备^[1-3]。

换流站工程建设工期非常紧,整个建设周期电气安装的时间一般仅有8至10个月,单台换流变压器生产需5个月、运输2个月、现场安装1个月,总周期长,特高压换流站全站有28台(4台备用相)。因此,换流变压器安装是制约整个换流站电气安装进度最为关键的设备。每台换流变压器出厂前要开展出厂试验,经历大件运输、现场安装后开展现场交接试验,交接试验项目全部通过并分系统调试完成后才可启动带电。换流变压器现场交接试验中绝缘电阻测试不合格问题经常出现,对工程建设进度造成较大影响,若未处理合格可能会对日后换流变压器运行会埋下安全运行隐患^[4]。

本文根据某特高压直流工程部分换流变压器绝缘电阻测试不满足交接试验规程问题,分析问题发生原因,排查了造成指标不合格各种因素,研究制定了综合处理方案并开展实际验证,结果表明,处理方法有效,可为其它工程类似问题提供处理思路、方法,在保证质量的同时,最大限度减少对工程进度的影响。

1 换流变压器绝缘电阻问题及影响

1.1 考核标准

换流变压器绝缘电阻测量是一项常用的试验方法,试验接线简单,测试方法便捷,读数直观^[5]。通常采用兆欧表来测量换流变压器的绝缘电阻,同时计算吸收比(将60 s和15 s时刻的绝缘电阻值比值)、极化指数(将600 s和60 s时刻的绝缘电阻值比值)。综合国标、行标交接试验规程及换流变压器厂家工艺控制标准^[6-7],一般现场主要考核标准为:在折算同一温度下绕组连同套管的绝缘电阻现场测试值不小于出厂值的70%,或折算到20℃下的绝对值(60 s)不小于10 GΩ。当绝缘电阻大于10 GΩ时,极化指数可不作考核要求。换流变压器在

出厂试验时做绝缘电阻测试,随后要经历大件运输、现场安装,在现场交接试验做绝缘电阻测试是对换流变压器绝缘状态及判断受潮的方法之一。

1.2 存在问题

以南方电网某特高压直流工程换流站电气安装过程中出现的4台高端换流变绝缘电阻问题为研究对象,结合当时紧张的建设工期,需综合各方因素在最短时间内制定有效处理方案,最大限度减少对工程进度的影响。换流变压器(编号以A、B、C、D代替)的绕组连同套管的绝缘电阻(包括网对地、阀对地、网阀对地)现场测试值未达到出厂值的70%,且折算到20℃下的绝对值(60 s)小于10 GΩ。

2 问题原因排查

首先要对绝缘电阻测试时天气、温度、人员、仪器及方法进行全排查。测试天气应选取晴天、空气湿度较低时开展;考虑环境温度和换流变压器绝缘油温影响,按规范要求温度折算;一般测试人员、仪器、方法为电气安装单位负责,换流变厂家人员也应该用厂内测试仪器及方法对比开展测试。综上,应排除上述因素导致的测试数据偏差问题。其次要从换流变压器大件运输环节开展全排查。查阅运输日志,检查从出厂至进站运输全过程换流变压器本体内气压情况,确认无漏气、负压及受潮情况。最后要核查换流变压器现场安装情况,从进场、存储、破氮安装、抽真空、注油、热油循环及对残油和新油处理指标等各环节的数据全排查,确保质量管控到位,安装工艺符合国家规程规定、符合南方电网换流变压器安装作业指导书要求及厂家安装工艺技术文件要求。

3 绝缘油问题分析及滤油处理措施

3.1 问题分析

1)对于“换流变压器A”,现场交接试验时发现绕组连同套管的绝缘电阻(网对地,网阀对地)现场测试值(折算到20℃)未达到出厂值的70%,同时也发现本体绝缘油在热油循环后介损值超过0.5%。

2)检查出厂测试值发现本台换流变压器横向对比其他台较低,但随后核查发现本台在厂内使用同一部分绝缘油,且该部分油使用的次数相对其他台偏多,进而导致出厂绝缘电阻测试比其他台相对偏

小。核查本台换流变本体残油和注入前新油的介损、耐压、微水、色谱、颗粒度等油化指标满足规范要求,但在热油循环后除油介损不满足,体积电阻率下降,其余油化指标均满足规范要求。综合各项指标分析,怀疑可能是换流变绝缘油不同程度污染造成介损超标、体积电阻率下降。由于油介损超标,可能导致换流变绝缘电阻值下降^[8]。

3.2 滤绝缘油介损措施及效果

由于工程进度非常紧,本台换流变压器安装进度是制约其对应阀组按期投产的关键路径,结合上述现象,考虑到工期,现场制定了立即过滤换流变压器本体绝缘油介损指标的处理方案。现场使用 BYJ 型降介损电子滤油机对本台换流变进行滤油循环,在 7 天内完成 5 遍滤油,期间不定期开启换流变油泵,本体油温控制在 40 ℃ 至 45 ℃。每滤一遍后测试本体绝缘电阻、检测油介损做为监视记录,监视过程中发现随着滤油时间和次数的增加,本体绝缘电阻值明显提高,绝缘油介损值明显下降,处理效果明显,如表 1 所示。最终,换流变绝缘电阻值及绝缘油介损值经通过了交接试验验收标准。

3.3 滤绝缘油介损措施总结

当换流变压器绝缘电阻现场交接试验测试值不合格,同时本体绝缘油介损值未达到 0.5% 时,工期紧急时可考虑优先将绝缘油介损值滤至合格,并关注换流变压器绝缘电阻值是否有提高趋势,持续滤油至合格为止。

4 低频负载短路电流加热工艺处理措施

4.1 问题分析

1) 对于“换流变压器 B、C、D”,现场交接试验时发现绕组连同套管的绝缘电阻(网对地、阀对地、网阀对地)现场测试值(折算到 20 ℃)未达到出厂值的 70%,且绝对值(60 s)小于 10 GΩ。本体绝缘油在热油循环后介损值合格。

2) 上述 3 台换流变压器绝缘电阻出厂试验时由于厂内环境控制非常到位,测试值在 13.1 GΩ 至 97.3 GΩ 之间,绝对值非常高。但工程安装现场很难达到厂内环境,要达到出厂值的 70% 较困难,现场采取增加热油循环次数和时间的方法,结果绝缘电阻增长值变化不大。为尽快解决问题,减少对工期影响,保证安装质量,现场决定采用

干燥换流变压器的方法提高绝缘电阻,即对上述 3 台换流变压器采取低频负载短路电流加热工艺处理措施^[9-11]。

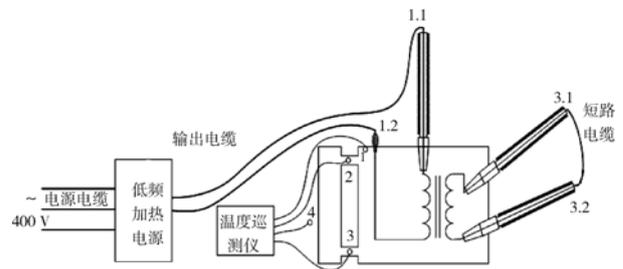
表 1 “换流变压器 A”绝缘电阻测试数据表(考虑温度折算)

Tab. 1 “Converter Transformer A” insulation resistance test data sheet(consider temperature conversion)

测试时间	处理前 (折算到 20 ℃)	R15s/ MΩ	R60s /MΩ	R600s /MΩ	与出厂值比较/%			绝缘 油介 损/%
					R15s	R60s	R600s	
出厂值	a	1 735	2 603	10 065	—	—	—	—
	b	5 900	8 243	47 723	—	—	—	—
	c	2 430	3 471	9 979	—	—	—	—
未处理前	a	375	1 040	3 793	21.6	40.0	37.7	3.60
	b	1331	5 858	55 503	22.6	71.1	116.3	2.84
	c	350	903	3 399	14.4	26.0	34.1	1.08
第 1 次处理后 36 h	a	637	2 034	6 757	36.7	78.1	67.1	中部 1.6
	b	2 126	9 650	46 220	36.0	117.1	96.8	底部 1.8
	c	776	2 050	6 845	31.9	59.1	68.6	—
第 2 次处理后 60 h	a	1 759	5 337	16 961	101.3	205	168.5	中部 0.8
	b	3 310	12 078	102 628	56.1	146.5	215	底部 0.8
	c	1 499	3 682	13 633	61.7	106.1	136.6	—
第 3 次处理后 84 h	a	1 656	4 562	14 225	95.4	175.3	141.3	中部 0.53
	b	4 244	10 978	122 327	71.9	133.2	256.3	底部 0.39
	c	1 474	3616	13 070	60.7	104.2	131.0	—
第 4 次处理后 108 h	a	2 171	5153	20 138	125.1	197.9	200.1	中部 0.48
	b	6 300	11 880	111 600	106.8	144.1	233.8	底部 0.43
	c	3 114	6 413	20 228	128.1	184.8	202.7	顶部 0.46
继续滤油 48 h	—	—	—	—	—	—	—	0.26

注: a—网对阀及地; b—阀对网及地; c—网、阀对地。

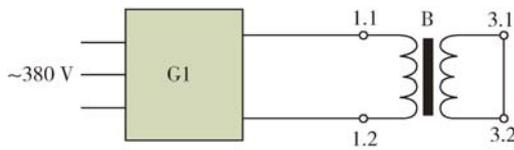
低频负载短路电流加热工艺设备连线图和接线示意图如图 1 和图 2 所示。



注: 1—顶层油温温度计; 2—冷却器出口温度计; 3—冷却器进口温度计; 4—环境空气温度计; 1.1—交流 500 kV 网侧套管; 1.2—交流中性线侧套管; 3.1—±600 kV 直流阀侧套管; 3.2—±600 kV 直流阀侧套管。

图 1 设备连线图

Fig. 1 Equipment wiring diagram



注: G1—低频加热电源柜, 1.25 MW, 1 kV, 1.25 kA; B—被试换流变。

图2 接线示意图

Fig. 2 Wiring diagram

4.2 低频负载短路电流加热工艺控制

1) 负载加热时净油机须参与净油循环, 低频负载加热同时启动滤油机进行循环处理, 换流变压器主体采取下部进油, 上部出油, 滤油机流量控制在 $10 \sim 12 \text{ m}^3/\text{h}$ 。负载加热循环过程中, 滤油机根据顶层面升温情况适时开启净油机加热器, 开启加热、脱水脱气功能。

2) 处理过程中负载电流升温时监测油顶层油温, 控制升温速度 $< 15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$, 从启动负载加热开始, 始终保持开启一组冷却器, 只开启潜油泵, 风扇不启动, 防止负载加热时线圈内部局部过热, 并每隔 2 h 切换至另一组冷却器, 控制油顶层油温 $\leq 75 \text{ }^\circ\text{C}$, 当顶层油温达到 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 后, 可以根据油温升高情况适当降低负载电流或关闭滤油机的加热功能, 使油顶层温度稳定在 $70 \sim 75 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当主体出口油温控制达到 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时开始计时, 持续负载电流循环时间 $\geq 1 \text{ h}$ 。然后取油样检测介损、耐压、含水情况进行监测。

3) 满足时间要求后停止加热, 冷却器同时也停止工作, 并须继续用高真空净油机进行热油循环, 循环路径调整为主体自上而下热油循环与负载加热循环路径相反。此时净油机开启加热功能, 并做好主体保温工作。循环方向为上部进油, 下部出油, 不加负载电流的热油循环主体出口油温控制在 $55 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, 循环处理时间 $\geq 24 \text{ h}$ 。循环后的油指标须满足如下指标: 耐压 $\geq 70 \text{ kV}$ 、含水 $\leq 0.008\%$ 、介损 ($90 \text{ }^\circ\text{C}$) $\leq 0.25\%$ 、颗粒度 ≤ 1000 个/100 ml 油 ($\geq 5 \mu$), 油指标满足上述要求后方可停止循环, 否则继续循环, 直至满足上述油指标。最后静放 72 h, 期间每 24 h 高点放气。

4.3 低频负载短路电流加热处理效果

对“换流变压器 B、C、D”在现场采取了低频负载短路电流加热的工艺处理措施后, “换流变压器 B、C”处理后绕组连同套管的绝缘电阻值已有提

升, 已经满足交接试验规范要求, 但“换流变压器 D”绝缘电阻对比值仍不满足, 且绝对值较低, 如表 2 至表 4 所示。

表 2 “换流变压器 B”绝缘电阻变化值(考虑温度折算)

Tab. 2 “Converter transformer B” insulation resistance test data sheet(consider temperature conversion)

项 目	出厂值 /GΩ	处理前值 /GΩ	比值 /%	处理后值 /GΩ	比值 /%
网对地 15 s	25.060	5.560	41	6.490	44.0
网对地 60 s	30.940	10.630	63	12.350	67.6
网对地 600 s	58.870	21.400	67	30.600	88.0
阀对地 15 s	43.330	13.280	56	20.800	81.0
阀对地 60 s	57.330	19.870	64	27.900	82.0
阀对地 600 s	97.300	51.500	97	57.330	99.0
网、阀对地 15 s	31.430	6.350	37	8.770	47.0
网、阀对地 60 s	39.130	11.830	56	18.530	80.0
网、阀对地 600 s	53.830	20.100	69	30.400	96.0
环境/ $^\circ\text{C}$	17.0	30.0	—	27.0	—
油温/ $^\circ\text{C}$	18.0	33.0	—	31.0	—

表 3 “换流变压器 C”绝缘电阻变化值(考虑温度折算)

Tab. 3 “Converter transformer C” insulation resistance test data sheet(consider temperature conversion)

项 目	出厂值 /GΩ	处理前值 /GΩ	比值 /%	处理后值 /GΩ	比值 /%
网对地 15 s	14.200	5.870	56	6.970	61.0
网对地 60 s	17.300	8.150	64	9.670	70.0
网对地 600 s	36.900	23.600	87	26.700	90.4
阀对地 15 s	39.600	12.500	43	15.130	47.7
阀对地 60 s	43.200	22.000	69	23.300	67.4
阀对地 600 s	73.400	58.000	107	51.200	87.0
网、阀对地 15 s	17.900	4.450	34	8.370	58.4
网、阀对地 60 s	20.500	9.270	61	12.760	77.8
网、阀对地 600 s	37.200	17.860	65	26.100	87.7
环境/ $^\circ\text{C}$	16.0	26.0	—	25.0	—
油温/ $^\circ\text{C}$	17.5	25.0	—	23.0	—

表 4 “换流变压器 D”绝缘电阻变化值(考虑温度折算)

Tab. 4 “Converter transformer D” insulation resistance test data sheet(consider temperature conversion)

项 目	出厂值 /GΩ	处理前值 /GΩ	比值 /%	处理后值 /GΩ	比值 /%
网对地 60 s	13.100	5.200	36	3.540	30.9
网对地 600 s	33.100	14.720	40	11.920	47.8
阀对地 15 s	34.100	7.990	21	5.630	18.9
阀对地 60 s	38.300	11.430	27	9.220	27.5

表 4(续) “换流变压器 D”绝缘电阻变化值(考虑温度折算)
Tab. 4(Cont.) “Converter transformer D” insulation resistance
test data sheet(consider temperature conversion)

项 目	出厂值 /GΩ	处理前值 /GΩ	比值 /%	处理后值 /GΩ	比值 /%
阀对地 600 s	71.700	40.500	51	31.900	51.0
网、阀对地 15 s	17.400	2.660	14	2.490	16.4
网、阀对地 60 s	27.600	4.260	14	4.190	17.4
网、阀对地 600 s	36.900	9.430	23	11.150	34.5
环境/℃	17.0	26.0	—	23.0	—
油温/℃	26.7	24.0	—	30.0	—

4.4 低频负载短路电流加热工艺处理措施总结

当换流变压器绝缘电阻现场交接试验测试值未合格, 本体绝缘油在热油循环后介损值合格时, 低频负载短路电流加热处理效果明显, 可作为绝缘电阻问题处理措施。

5 更换绝缘油措施

对于“换流变压器 D”在现场多次低频负载短路电流加热工艺处理后, 绝缘电阻对比值仍不满足, 且绝对值较低, 现场决定采用彻底更换绝缘油措施。将换流变压器本体的出口油温加热至 55℃后再排放绝缘油, 然后按照厂家工艺文件进行抽真空、真空注油机热油循环工艺处理措施, 待换流变压器油温降至 40℃以下后进行绝缘电阻测量。经彻底更换绝缘油后, 最终该台换流变压器绝缘电阻测试值满足了交接试验规范考核标准要求。

6 结论

本文针对某特高压直流工程 4 台高端换流变压器绝缘电阻测试不合格问题详细分析了原因, 首先排查了造成指标不合格各种因素, 然后研究制定了综合处理方案并开展实际验证。结果表明, 根据不同情况, 区分轻重缓急的综合处理方案如下:

1) 当换流变压器绝缘电阻现场交接试验测试值未合格, 同时本体绝缘油介损值未达到 0.5% 时, 工期紧急时可考虑优先将绝缘油介损值滤至合格, 并关注换流变压器绝缘电阻值是否有提高趋势, 持续滤油至合格为止。

2) 当换流变压器绝缘电阻现场交接试验测试值未合格, 本体绝缘油在热油循环后介损值合格时, 采取低频负载短路电流加热处理效果明显, 可作为

绝缘电阻问题处理措施。

3) 对于已多次采取低频负载短路电流加热工艺处理, 绝缘电阻测试值仍然不满足且绝对值较低时, 现场采用彻底更换绝缘油措施效果明显, 可作为绝缘电阻问题处理措施。

以上处理方案可为其它工程类似问题提供处理思路, 每种方案所消耗的时间大不相同, 由于特高压换流站建设工期非常紧张, 因此, 在保证质量前一下, 选取最为合适的处理方案, 才能最大限度减少此问题对工程进度的影响。

参考文献:

- [1] 谢毓城. 电力变压器手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [3] 周浩. 特高压交直流输电技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014.
- [4] 陈天翔, 王寅仲, 海世杰. 绝缘电阻试验判断变压器绝缘的判据探讨 [J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 21-22+26.
- [5] 胡启凡. 变压器试验技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [6] 中国电力企业联合会. ±800 kV 高压直流设备交接试验: DL/T 274—2012 [S]. 北京: 国家能源局, 2012.
- [7] 中国电力企业联合会. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB/T 50150—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [8] 赖启结. 绝缘油介损异常对变压器绝缘电阻的影响以及处理方法和建议 [J]. 广东输电与变电技术, 2008(4): 42-44.
- [9] 官澜, 李博, 刘锐, 等. 特高压换流变压器低频电流短路法现场加热装置研制及应用 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6585-6591.
- [10] 刘泽洪. 特高压交、直流变压器现场加热措施及装置研究 [R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [11] 王春霞. 电力变压器的干燥方法 [J]. 电工技术, 2009(6): 17-19.

作者简介:



LU X

鲁翔(通信作者)

1985-, 男, 青海西宁人, 南方电网超高压输电公司工程师, 基建业主项目部主管兼分部副经理, 湖南大学学士, 主要从事特高压直流工程建设管理工作 (e-mail) dianqi_lu@126.com。

(责任编辑 郑文棠)