

统一潮流控制器用 500 kV 油浸式串联变压器技术解析

吴 鹏¹, 陶风波¹, 蔚 超¹, 李 群¹, 杨小平², 王 骏³, 孙 磊¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京, 211103; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京, 210029; 3. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京, 211106)

摘 要:500 kV 串联变压器是苏州 500 kV 统一潮流控制器(UPFC)工程中的关键设备,承担着换流器与线路电压、功率输送调节的任务。由于 500 kV 串联变压器特殊的联结方式和运行工况,其与常规 500 kV 变压器存在诸多不同。第一,网侧绕组相对地主绝缘与线路电压等级匹配,而端间纵绝缘则由各项过电压决定,带来了网侧绕组绝缘水平复杂的特点;第二,绝缘试验中雷电全波冲击试验和外施耐压试验也与常规变压器差异较大;第三,串联变压器的特殊工况造成了其对抗短路能力和过励磁能力要求高的特点。在苏州 UPFC 工程中,针对 500 kV 油浸式串联变压器开展了大量的技术研究,克服了网侧绕组绝缘复杂、试验技术特殊、抗短路能力和过励磁能力要求高等难题。文中分别从运行工况、技术特点和试验要求等方面对苏州 UPFC 工程中 500 kV 串联变压器进行技术解析。

关键词:统一潮流控制器; 串联变压器; 过励磁

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)01-0014-05

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)是一种可分别或同时实现并联补偿、串联补偿、移相和端电压调节等多种功能的可控硅控制装置。可在不改变网架结构的前提下调节潮流、提高系统的输电能力,通过快速无功吞吐,动态地支撑接入点的电压,提高系统电压稳定性,是一种先进的柔性输电技术^[1-2]。截至目前,世界上真正投入工业化运行的 UPFC 仅有 4 套,分别位于美国电力(American Electric Power, AEP)肯塔基州的 Inez 变电站、美国纽约电力局的 Marcy 变电站、韩国南半部的 Kangjin 变电站和中国江苏南京西环网铁北变电站^[3-4]。2017 年投运的苏州 UPFC 变电站是世界首个 500 kV 电压等级的 UPFC 工程。

500 kV 串联变压器是 UPFC 工程关键设备,承担着换流器与线路电压、功率输送调节的任务。串联变压器网侧绕组串联入线路,阀侧绕组接入换流器,换流器产生幅值、相位可控的电压,通过串联变压器变换到网侧,就可以等效为在线路上串入了 1 个幅值、相位可调的电源,实现 UPFC 的功能^[5]。串联变压器具有特殊的联结方式和运行工况,与常规变压器存在诸多不同。网侧绕组主绝缘与线路电压等级匹配,而网侧绕组额定电压往往远低于线路电压,带来了网侧绕组绝缘水平复杂的特点。因此,绝缘试验中雷电全波冲击试验和外施耐压试验

与常规变压器差异较大。另外,串联变压器的特殊工况造成了其对抗短路能力和过励磁能力要求高的特点^[6]。

文中主要针对苏州 UPFC 用 500 kV 油浸式串联变压器的技术特点进行深入解析。

1 运行工况

串联变压器应用于 UPFC 中,其网侧绕组串联于高电压等级线路中,阀侧绕组接入换流器,平衡绕组仅提供三次谐波通路,通过刀闸和开关实现串联变压器的投入和退出,如图 1 所示。

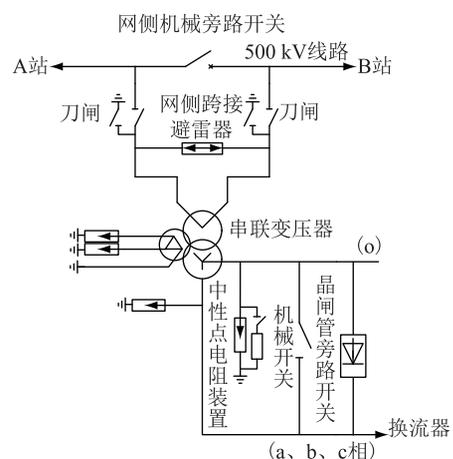


图 1 串联变压器在 UPFC 中的基本接线示意

Fig. 1 Schematic diagram of the series transformer in UPFC

合上网侧机械旁路开关,拉开串联变压器网侧 2 个刀闸,则串联变压器退出运行。若合上串联变压器网侧 2 个刀闸,拉开网侧机械旁路开关,串联变

压器网侧串入线路,则串联变压器投入运行,控制换流器输出幅值和相位可调的电压,通过串联变压器阀侧到网侧的能量变换传输,相当于在网侧线路上叠加 1 个幅值和相位可调的电压源,实现线路有功和无功的精确控制,达到电网潮流控制的目的。

串联变压器通过网侧机械旁路开关拉开或闭合可实现投入或退出,机械旁路开关合闸时间约为几十毫秒;阀侧绕组除配置机械旁路开关外,还配置了晶闸管旁路开关,晶闸管旁路开关合闸时间约为几个毫秒。由于串联变压器网侧绕组额定电压较系统电压偏低,其网侧绕组匝数较常规 500 kV 变压器偏少,网侧绕组端间绝缘难以承受 500 kV 系统的标准雷电过电压的冲击,需在网侧绕组两端就近配置网侧跨接避雷器来限制网侧绕组端间雷电过电压,可降低串联变压器制造难度,网侧跨接避雷器的选型应与网侧绕组绝缘水平匹配。

正常运行工况下,串联变压器网侧绕组和阀侧绕组基本为额定电流,网侧绕组额定电流与线路额定电流一致,阀侧绕组额定电流根据网侧额定电流按照变比计算得到。

阀侧开路故障情况下,从网侧看进去串联变压器的阻抗会产生变化,接近于线路串联电抗器,不考虑外部潮流的变化,串联变压器网侧绕组仍需要流经线路额定电流,而阀侧绕组和平衡绕组电流为零。

网侧绕组线路单相接地短路故障情况下,阀侧绕组将由晶闸管旁路开关在极短时间内动作,将阀侧绕组短路导通。根据 500 kV UPFC 工程系统短路电流计算可得:网侧绕组远景年最大短路电流约为额定电流的 13 倍,持续 0.25 s。

2 技术特点

2.1 基本参数

苏州 UPFC 工程 500 kV 串联变压器基本参数见表 1。串联变压器网侧绕组相对地虽然为 500 kV 电压等级,但网侧绕组额定电压仅为 $43.5/\sqrt{3}$ kV,远低于阀侧额定电压,10 kV 电压等级平衡绕组三相联结成三角形提供三次谐波通路。500 kV 串联变压器单相容量为 100 MV·A,平衡绕组容量为 34 MV·A。

表 1 串联变压器基本参数

Tab.1 Basic parameters of series transformers

项目	网侧	阀侧	平衡
额定电压/kV	$43.5/\sqrt{3}$	$105/\sqrt{3}$	10
额定容量/(MV·A)	100	100	34

2.2 结构型式

500 kV 串联变压器绕组形式为单相双绕组带平衡绕组,分接方式为无分接。由于串联变压器网侧绕组串联接入线路中,其网侧绕组对地绝缘水平与 500 kV 线路电压等级匹配,因此串联变压器绕组不能采用自耦形式,需要独立的双绕组结构。另外,串联变压器阀侧绕组接入换流器,换流器本身可以改变电压幅值和相位,因此串联变压器不需要调电压的分接开关,采用无分接形式。

2.3 联结组标号

500 kV 串联变压器的联结组标号与常规变压器差异较大,主要是其网侧绕组串联接入线路,并不像常规变压器三相联结成星形或三角形。其联结组标号为:单相为 I0(网侧),I0(阀侧),i0(平衡绕组);三相联结为 III(网侧),yn(阀侧),+d11(平衡绕组);网侧绕组首末端分别引出,绕组联结如图 2 所示。

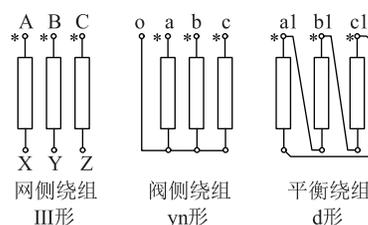


图 2 500 kV 串联变压器三相绕组联结

Fig.2 500 kV series transformer winding connection diagram

2.4 绝缘水平

网侧绕组串联入 500 kV 系统,其绝缘水平应主要参考 500 kV 系统,并且充分考虑网侧绕组匝数少的特征和过电压情况,确定该绕组采用全绝缘结构。阀侧绕组和平衡绕组绝缘水平根据系统设计参照 GB 311.1—2012^[7]执行,还应满足网侧绕组绝缘试验时传递过电压要求。500 kV 串联变压器绕组绝缘水平如表 2 所示。

表 2 绕组绝缘水平

Tab.2 Insulation level of windings kV

绕组绝缘分类	额定操作冲击耐受电压 (峰值)	额定雷电全波冲击耐受电压 (峰值)	额定短时感应或外施耐受电压 (方均根值)
网侧绕组端间	750	950	200
网侧绕组相对地	1175	1550	680
阀侧绕组端间	480	400	200
平衡绕组	200	—	85

串联变压器的特殊性决定了网侧绕组匝数少,网侧绕组难以承受 500 kV 系统的雷电冲击过电压,

从而需要在网侧绕组端间就近配置跨接避雷器来限制网侧绕组端间雷电过电压水平。经核算通过跨接避雷器可以将串联变压器网侧绕组端间雷电过电压限制在 750 kV 左右,因此将串联变压器网侧绕组端间额定雷电全波冲击耐受电压(峰值)设计为 950 kV,既可以保障绝缘安全裕度,又尽量降低了串联变压器设计制造难度。

由于运行工况中 500 kV 串联变压器存在网侧机械旁路开关闭合、刀闸也闭合的热备用状态,因此网侧绕组相对地额定雷电全波冲击耐受电压(峰值)设计为 1550 kV^[8],并且按照双端同时入波进行绝缘设计和试验考核。

网侧绕组端间额定短时感应或外施耐受电压进行设计校核,远大于运行过电压和试验传递过电压,由于串联变压器特殊结构原因无法试验验证。

2.5 承受短路能力

串联变压器串联于线路中,一旦线路发生相间、相对地短路时,线路上的短路电流就会穿越串联变压器网侧绕组,阀侧绕组的晶闸管快速旁路开关(TBS)会快速导通。相当于阀侧绕组短路,网侧绕组会通过短路电流,根据计算该方式下网侧绕组承受的短路电流相比常规变压器短路要大很多。综合考虑流经串变短路电流限制及换流器容量选择的需求,串变短路阻抗按 20%考虑。根据远景年短路电流计算,500 kV 母线最大短路电流为 53 kA。考虑对应线路分支影响,并计及串变短路阻抗影响,经计算流经串变绕组的故障电流为 37 kA。并以此作为流经串联变压器短路电流最大工频分量有效值,取短路电流冲击系数为 2.69^[9],可以计算得到串联变压器短路电流最大峰值为 99.53 kA。500 kV 串联变压器制造完成后,经短路试验验证满足承受短路能力要求。

2.6 承受过励磁能力

串联变压器串联于线路中,正常运行中阀侧绕组低阻导通运行,网侧绕组中只有几个安培电流用于励磁。

阀侧开路故障情况下,阀侧绕组开路,网侧绕组电流受制于线路输送容量变化缓慢,则串联变压器相当于串联电抗器,线路电流将全部参与励磁,串联变压器将出现严重的过励磁状态。经有限元仿真计算,正常工况和阀侧开路过程中串联变压器铁心磁通密度分别如图 3、图 4 所示。

硅钢片材质铁心通常磁通密度在 2T 已经开始饱和,可以看出阀侧开路状态时铁心局部出现了磁饱和。

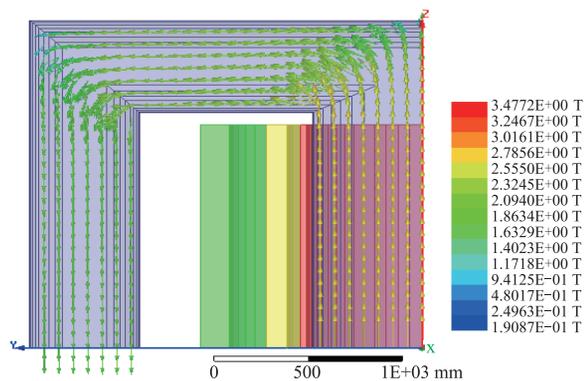


图 3 阀侧开路工况下铁心的磁密

Fig.3 The core magnetic field under value winding open circuit

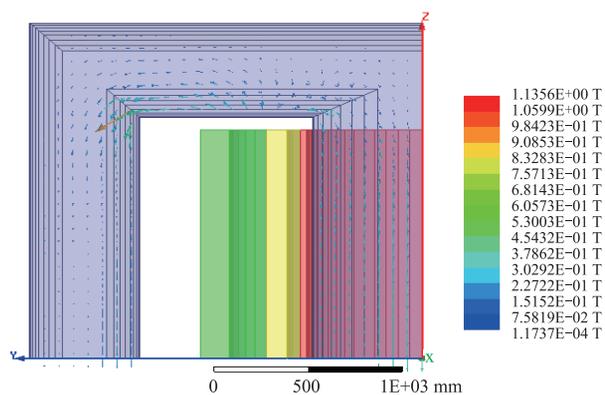


图 4 正常运行工况下铁心磁密

Fig.4 The core magnetic field under normal operation

3 试验要求

串联变压器的大部分试验项目要求与常规变压器无特殊差异,如电压比及联结组标号测量、绕组直阻测试、绕组对地及绕组间电容及介损测试、绝缘电阻测量、负载试验、空载试验、长时感应耐压试验、绕组频率响应特性试验、操作冲击试验、温升试验、声级测定等。而网侧绕组雷电全波冲击试验、网侧绕组外施交流耐压试验则存在显著差异,具体差异如下。

3.1 网侧绕组雷电全波冲击试验

串联变压器网侧绕组采用的全绝缘设计,雷电波从网侧绕组两端均可能侵入,因此,每个网侧绕组应分别开展两端的雷电全波冲击试验。串联变压器网侧绕组往往匝数少,网侧绕组与阀侧绕组变比为 43.5/105,串联变压器内部的过电压传递比常规变压器更加复杂和严重,因此网侧绕组端间雷电全波冲击试验中不能将阀侧绕组和平衡绕组简单短路接地,需要顺便开展传递过电压对阀侧绕组和平衡绕组的考核。因此,开展网侧绕组端间雷电全

波冲击试验时,考虑传递过电压,阀侧绕组和平衡绕组端头宜接避雷器,避雷器应与工程中配置一致。

开展网侧绕组端间雷电全波冲击试验时,网侧绕组一端入波,另一端经分流器接地;阀侧绕组一端经避雷器接地,另一端直接接地;平衡绕组一端经避雷器接地,另一端直接接地,试验接线如图 5 所示。

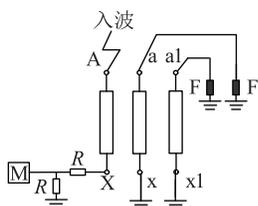


图 5 串联变压器网侧绕组端间雷电冲击试验

Fig.5 Lightning impulse test of the side windings of the series transformers

由于存在网侧绕组两端同时侵入雷电冲击的情况,因此在开展网侧绕组相对地雷电全波冲击试验时,应充分考虑工程实际接线情况,采用网侧绕组两端短接同时入波的雷电冲击试验。试验接线如图 6 所示,网侧绕组两端短接入波,阀侧绕组一端经避雷器接地,另一端经分流器接地;平衡绕组一端经避雷器接地,另一端直接接地。

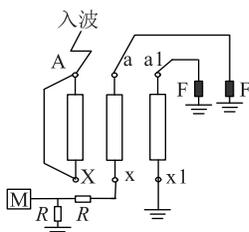


图 6 串联变压器网侧绕组相对地雷电冲击试验

Fig.6 Lightning impulse test of the winding of the series transformers to earth

因避雷器的存在,试验程序中应在全电压全波冲击试验后进行不同电压值的降低电压全波冲击试验。该降低电压值与试验电压逐次上升至全压全波冲击试验过程中所用的几个电压降低值相同,例如:60%,80%,100%,100%,100%,80%,60%。对于带避雷器的雷电全波冲击试验,降低电压全波冲击示波图与全电压全波冲击示波图可能存在差异。因此可对 3 次全电压全波冲击示波图进行比较,并对相同电压值的降低电压全波冲击示波图试验前后进行比较,无明显差异,则认为试验合格。

3.2 网侧绕组外施交流耐压试验

串联变压器网侧绕组相对地主绝缘水平与端间的纵向绝缘水平不匹配,相对地主绝缘水平与接入线路电压等级相关,额定短时感应或外施耐受电

压为 680 kV;而网侧绕组端间纵向绝缘水平需要综合考虑额定电压、绕组匝数和各种过电压水平来确定,设计为 200 kV,低于主绝缘水平。由此,长时感应耐压带局放测量试验在网侧绕组感应出来的电压只达到了最高额定电压的 1.7 倍(约 42.7 kV),不足以考核网侧绕组主绝缘的局部放电水平,需要采用外施交流耐压试验来考核。

开展试验时应进行局部放电测量,试验接线如图 7 所示。施加电压应按图 8 所示的电压时间顺序来检验变压器的局部放电性能。

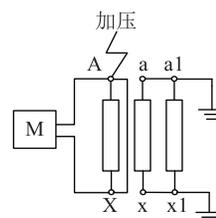


图 7 串联变压器网侧绕组外施交流耐压试验

Fig.7 The test of the external voltage withstand test of the series transformer net side winding

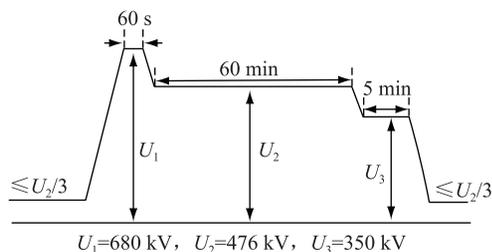


图 8 外施耐压试验流程

Fig.8 The external voltage withstand test procedure

- (1) 在不大于 $U_2/3$ 的电压下接通电源, U_2 为 1.5 倍最高相对地电压;
- (2) 上升至 U_1 保持 60 s, U_1 为试验耐受电压;
- (3) 降低至 U_2 保持 60 min, 测试局部放电量;
- (4) 降低至 U_3 保持 5 min, U_3 为 1.1 倍最高相对地电压, 测试局部放电量;
- (5) 当电压降低至不大于 $U_2/3$ 的电压, 方可断开电源。

各测试阶段局放量均不应大于 100 pC。

4 结语

文中充分考虑 500 kV 油浸式串联变压器与常规变压器的差异性及其特点,在技术特点方面对 500 kV 油浸式串联变压器的基本参数、结构型式、联结组标号、绝缘水平、承受短路能力、承受过励磁能力等进行了解析;在试验方面规定了 500 kV 油浸式串联变压器独特的试验项目,如雷电全波冲击试验和外施交流耐压带局放测试试验的具体要求。

参考文献:

- [1] 潘磊,李继红,田杰,等.统一潮流控制器的平滑启动和停运策略[J].电力系统自动化,2015,39(12):159-164,171.
PAN Lei, LI Jihong, TIAN Jie, et al. Smooth start and stop strategies for unified power flow controllers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 159-164, 171.
- [2] 王帅兵,李琳,谢裕清,等.统一潮流控制器中串联耦合变压器特性及仿真模型研究[J].电网技术,2017,41(2):551-557.
WANG Shuaibing, LI Lin, XIE Yuqing, et al. Research on SCT characteristics and simulation model in UPFC system[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 551-557.
- [3] 李晓明,曹冬明,田杰,等.统一潮流控制器用串联变压器设计[J].电力工程技术,2016,35(1):41-44.
LI Xiaoming, CAO Dongming, TIAN Jie, et al. The design of series transformer applied in the unified power-flow controller[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1): 41-44.
- [4] 李鹏,林金娇,孔祥平.统一潮流控制器在苏南500 kV电网中的应用[J].电力工程技术,2017,36(1):20-24.
LI Peng, LIN Jinjiao, KONG Xiangping. Application of UPFC in the 500 kV Southern Power Grid of Suzhou[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 20-24.
- [5] 陈柏超,田翠华.电磁式特高压统一潮流控制器[J].高电压技术,2006,32(12):96-98.
CHEN Baichao, TIAN Cuihua. Ultra-high voltage unified power flow controller of electromagnetic type[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 96-98.
- [6] Q/GDW 11551—2016 统一潮流控制器用220 kV油浸式串

联变压器技术规范[S].北京:中国标准出版社,2017.

- Q/GDW 11551—2016 Technical specification for 220 kV series oil transformer of unified power flow controller[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [7] GB 311.1—2012 绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则[S].北京:中国标准出版社,2012.
GB 311.1—2012 Insulation coordination—Part 1: Definitions, principles and rules[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [8] GB1094.3—2016 电力变压器 第3部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙[S].北京:中国标准出版社,2016.
GB1094.3—2016 Power transformers—Part 3: Insulation levels, dielectric test and external clearances in air[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [9] GB1094.5—2008 电力变压器 第5部分:承受短路的能力[S].北京:中国标准出版社,2008.
GB1094.5—2008 Power transformers—Part 5: Ability to withstand short circuit[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

作者简介:



吴鹏

吴鹏(1983—),男,博士,高级工程师,从事变压器技术相关工作(E-mail: varletwp@163.com);

陶风波(1982—)男,博士,高级工程师,从事过电压技术相关工作(E-mail: 15105168821@163.com);

蔚超(1984—)男,硕士,高级工程师,从事变压器技术相关工作。

Technical Analysis of 500 kV Oil-immersed Series Transformer for Unified Power Flow Controller

WU Peng¹, TAO Fengbo¹, WEI Chao¹, LI Qun¹, YANG Xiaoping², WANG Jun³, SUN Lei¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Nanjing 210029, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211106, China)

Abstract: 500 kV series transformer is the key equipment in Suzhou 500 kV unified power flow controller (UPFC) project, which undertakes the regulation of voltage and power between the converter and the line. Because of the special connection mode and operating condition of 500 kV series transformers, there are many differences from conventional transformers. First, the main insulation of the net side winding is matched with the line voltage grade, and the longitudinal insulation of the end is determined by the overvoltage, which brings about the complex characteristics of the insulation level of the net side windings. Secondly, the lightning full wave shock test and the external AC withstand voltage test are also different from the conventional transformers in the insulation test. Finally, the special working condition of series transformer has caused the high requirement of resisting short-circuit ability and over excitation capability. In Suzhou UPFC Project, a large number of technical researches have been carried out for 500 kV oil-immersed series transformers, which overcomes the difficult problems of the complex insulation of the windings, the special test technology, the short circuit ability and the high excitation ability. In this paper, the technical analysis of 500 kV series transformers in Suzhou UPFC project is carried out from various aspects, such as operating conditions, technical characteristics and test requirements.

Key words: unified power flow controller; series transformer; over excitation

(编辑 方晶)