

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.007

1 000 kV特高压中性点电抗器匝间绝缘性能研究

李予全, 寇晓适, 郑含博, 王伟, 邵颖彪, 马伦,
李晓纲, 郭磊, 谢伟

(国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052)

摘要:文中主要研究了1 000 kV特高压交流输电工程中使用的中性点电抗器的绝缘特性。首先,通过工频过电压分析和特高压工程系统调试期间实测数据,仿真分析了中性点电抗器在冲击电压下的电位分布;接着提出了用于考核中性点电抗器匝间绝缘性能的现场耐压试验方法,并对中性点电抗器在试验中动热稳定性进行了计算及校核,理论论证了现场耐压试验的可行性和适用性;最后文中用于考核特高压中性点电抗器绝缘性能的试验方法在现场得到验证。文中提出的应用于特高压中性点电抗器的现场匝间绝缘考核的试验方案可以作为今后交接试验的参考。

关键词:交流特高压;中性点电抗器;匝间绝缘;动稳定性;热稳定性

Turn Insulation Performance of Neutral Reactor Under 1 000 kV UHV Alternating Current

LI Yuquan, KOU Xiaoshi, ZHENG Hanbo, WANG Wei, SHAO Yingbiao,
MA Lun, LI Xiaogang, GUO Lei, XIE Wei

(State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: To understand the insulation property of neutral reactor in 1 000 kV UHV AC transmission project, the power frequency overvoltage was analyzed and the debugging data of the project were use to simulate the potential distribution of the neutral reactor under impulse voltage. Then, an on-site withstand voltage test method of turn insulation of neutral reactor was proposed, the dynamic stability and thermal stability of the neutral reactor in test process were calculated and checked, and the feasibility and applicability of the on-site withstand voltage test of turn insulation were proved theoretically. In addition, the proposed test method was verified in practical application. This test method is expected to be applied to hand over test of neutral reactor.

Key words: ultra-high voltage AC; neutral reactor; turn insulation; dynamic stability; thermal stability

0 引言

晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程于2009年1月份正式投入运行。这是世界上第1条投入商业化运行的1 000 kV输电线路。特高压线路中并联电抗器主要用以补偿线路的容性无功从而抑制工频过电压。

通过电磁暂态程序 ATP-EMTP 仿真分析以及现场模拟单相短路重合闸等故障时的录波信息,高压并联电抗器中性点即 X_N 首端将承受最高为 170.6 kV 的电压^[1-3],特别是在特高压工程系统调试期间,曾经

出现过中性点小电抗绝缘击穿的问题,经过分析发现是由于电抗器匝间绝缘破坏。鉴于目前现场外施耐压试验仅考核了电抗器的主绝缘,而对本身的匝间绝缘没有得到有效考核。因此,在电抗器厂家提高了电抗器的设计绝缘性能后,文中将中性点小电抗的匝间绝缘能力考核作为研究对象,对其内部电场分布、现场试验时动热稳定性进行了校核计算,并据此提出并实现了现场匝间绝缘耐压试验。

1 电抗器参数及绝缘水平

1.1 1 000 kV 主系统图

晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 特高压交流输

电工程中,线路总长 639.8 km,其中晋东南长治变电站装有一组高抗,容量 960 Mvar;南阳变电站具有两组高抗,分别布置在长南 I 线及南荆 I 线,每组容量为 720 Mvar;荆门变电站装有一组高抗,容量 600 Mvar。系统主接线图见图 1。

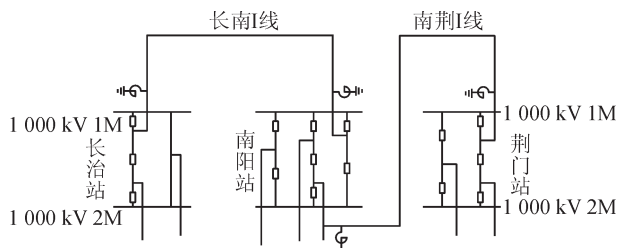


图 1 特高压系统主接线图

Fig. 1 System wiring diagram for UHVAC

1.2 中性点电抗器用途

当线路自两侧切除后,非故障线路与断开线路之间存在的电容耦合和电感耦合,继续向故障线路提供潜供电流,从而严重阻碍短路时弧光通道去游离;同时自动重合闸只有在故障点电弧熄灭且绝缘强度回复后才有可能成功,若潜供电流太大,会导致重合闸失败。通过在线路上加装一组三角形接线的电抗器,补偿相间电容,从而抑制一部分潜供电流的横分量;在线路首末两端加装一组星接电抗器用于抵消潜供电流的纵分量^[4-6]。上述两组电抗器可以等效为中性点对地加装小电抗 X_N 的星形连接的电抗器,见图 2。

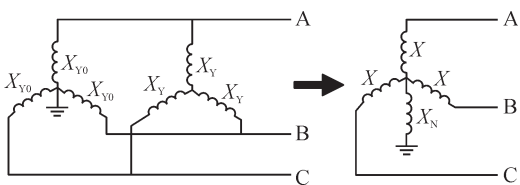


图 2 并联电抗器等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of shunt reactor

1.3 中性点电抗器技术参数

每组均装设有一台中性点电抗器,文中以南阳变电站长南 I 线高抗为例进行研究,其装设的中性点电抗器技术参数见表 1。

2 试验方法研究

2.1 现场匝间耐压方案

根据文[7]要求,现场进行中性点电抗器匝间耐压试验,在电抗器首端加压,尾端接地。由于电抗器自身电感量较大,现场进行耐压试验时,需要很大的无功功率,为满足现场需求,使用补偿电容器对无功功率实现补偿;根据电抗器本身电感量,为降

表 1 中性点电抗器参数

Table 1 Parameters of neutral-point reactor

型号	额定容量/kvar	额定电流/A	绝缘水平/kV	
			线路端子	中性点端子
XKD-361/154	329	30	LI/AC750/325	LI/AC200/85

低现场无功补偿所需电容量,通过提高试验电源频率来实现。加压方案见图 3。

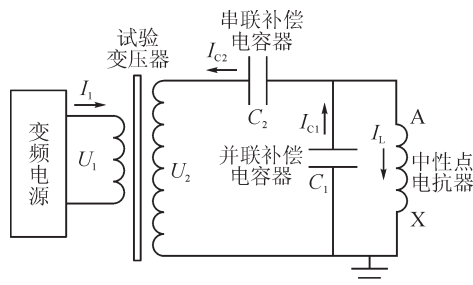


图 3 中性点电抗器匝间耐压方案

Fig. 3 Withstand voltage for neutral-point reactor

2.2 试验参数计算

南阳站长南 I 线高抗所装设的中性点电抗器在 50 Hz 额定频率下的阻抗值为 412.49Ω ;如前所述,为减少现场补偿电容的大小,使用变频电源调高试验频率,此时电抗器对应阻抗值也对应增加;根据现场条件及生产能力,选择 5 台电容量为 50 nF 的补偿电容器并联使用,用以补偿无功电流;选择 1 台电容量为 50 nF 的补偿电容器串联使用,用以提高电压。考虑整个回路达到谐振状态,此时谐振频率 f 为 253 Hz。

感应耐压试验电压值按照 80% 的耐压水平,即 260 kV,在此电压下流过电抗器的电流为

$$I_L = \frac{U}{j\omega L} = \frac{U}{2\pi f L} \quad (1)$$

由电路理论可以估算出在试验电压下流过并联补偿电容器 C_1 的电流见式(2)

$$I_{C1} = \frac{U_2}{1/(j\omega C_1)} = U j\omega C_1 \quad (2)$$

整个试验系统在该频率下,由并联电容器补偿后,试验变输出电流为

$$I_{OUT} = I_{C2} = I_L - I_{C1} \quad (3)$$

根据式(1)~(3)得出感应耐压的 60 s 内,流过中性点电抗器的电流为 124 A,鉴于中性点电抗器的额定电流为 30 A,电抗器能否经受此电流的冲击,笔者进行详细的动热稳定性分析。

3 理论分析

电抗器正常运行频率为 50 Hz,现场感应耐压

中满足现场无功补偿要求, 需要提高试验电压频率, 根据文[8]内容, 已对变频频率电压下绝缘考核与工频电压考核等效性进行了论证。

3.1 电抗器绝缘裕度分析

利用仿真软件, 对中性点电抗器在不同电压下电场强度的分布进行分析^[9-13], 见图4。

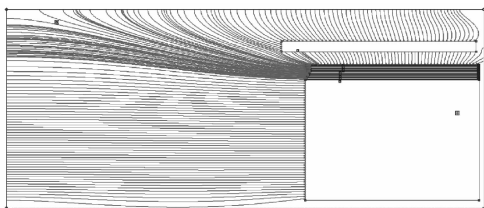


图4 电抗器电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of shunt reactor

根据仿真结果, 对中性点电抗器在局放电压和工频电压下的绝缘裕度进行计算, 可以确认该中性点电抗器可以耐受所加电压, 结果见表2。

表2 中性点电抗器绝缘裕度

Table 2 Insulation margin of neutral-point reactor

项目	试验电压/kV	最小安全系数
局放	145	4.02
工频耐压	325	3.22

3.2 大电流冲击下热稳定性分析

根据 GB 1094.5—2008, 绕组热稳定平均按式(4)进行计算

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 235)}{\frac{106\,000}{J^2 \times t} - 1} \quad (4)$$

式(4)中: θ_1 为绕组大电流冲击 t (s) 后的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_0 为绕组起始温度, $^{\circ}\text{C}$; J 为大电流冲击电流密度, A/mm^2 ; t 为持续时间, s。

根据要求, 电抗器大电流冲击热稳定电流值按 124 A, 60 s 计算, 相关数据及计算结果见表3。

表3 热稳定校核结果

Table 3 Thermal stability assessment

项目	绕组
$\theta_0/^{\circ}\text{C}$	105.00
$J/(\text{A} \cdot \text{mm}^{-2})$	1.74
t/s	60.00
$\theta_1/^{\circ}\text{C}$	106.20

绕组在热稳定时间内平均温度值未超过 250°C , 该电抗器绕组满足热稳定要求。

3.3 大电流冲击下动稳定性分析

笔者对电抗器进行整体建模, 其次根据压钉、器身垫块、压板、托板等承压结构的刚度系数^[14-19],

计算出电抗器的固有频率以及电抗器轴向及径向的漏磁分布, 及在该磁场分布下轴向和径向大电流冲击力及安全系数^[20-22]。绕组的动力学模型见图5, 绕组中线饼简化为质量点, 饼间垫块简化为弹簧。

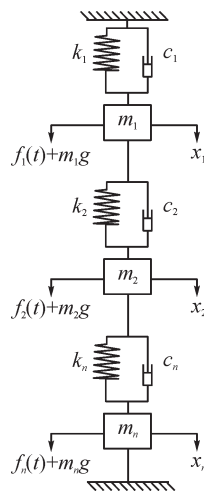


图5 电抗器动态模型

Fig. 5 Dynamic model of reactor

由最大电流峰值容易得到, 最大漏磁通密度为

$$B_m = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_m}{H_w} = \frac{1.256 N \cdot I_m}{H_w} \times 10^{-3} \quad (5)$$

式(5)中: $\mu_0 = 1.256 \times 10^{-6}$ 为真空(空气)的磁导率, H/m ; N 为线圈匝数; H_w 为线圈几何高度, mm 。

因此, 可计算线圈每匝导线单位长度受力为

$$F_u = \frac{1}{2} B_m \cdot I_m \quad (6)$$

则, 整个绕组线圈的径向力为

$$F_r = \pi D_m \cdot N \cdot F_u = \frac{1.97 (I_m N)^2 D_m}{H_w} \times 10^{-6} \quad (7)$$

式(7)中, D_m 为线圈的平均直径, mm 。

可以计算, 绕组每一线饼所受的电力(线饼的平均受力) F_c (N/mm) 为

$$F_c = \frac{F_r}{\pi D_m \cdot M_1} \quad (8)$$

式(8)中, M_1 表示绕组线饼的个数。

径向和轴向的机械强度和大电流冲击下的对应机械力以及安全系数计算结果见表4、5。

表4 径向动稳定校核结果

Table 4 Radial dynamic stabilization assessment

线圈	径向压力/ ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1}$)	机械强度/ ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1}$)	安全系数
高压线圈	1.62	16.83	10.37

通过对中性点电抗器的电场、动热稳定性的理论分析和计算, 电抗器本体可以承受现场短时感应耐压试验。

表 5 轴向动稳定校核结果

Table 5 Axial dynamic stabilization assessment

线圈	方向	轴向压力/ (kg·mm ⁻¹)	机械强度/ (kg·mm ⁻¹)	安全 系数	位移/ mm	允许位 移/mm
高压 线圈	向上	18.30	666.35	36.75	0.38	25.00
	向下				-2.78	25.00

4 现场试验分析

按照图 3 所示的感应耐压加压原理图进行现场加压试验, U_2 达到试验电压后, 规定时间内中性点电抗器未发生绝缘击穿。其中被试中性点电抗器首端电压达到 258.5 kV, 流过电流 122 A; 选用变频电源及试验变压器的容量均为 450 kW。

试验过程中使用红外成像仪密切监视试验电压下电抗器本体温升情况, 红外测温显示本体温升未超过标准要求。

使用频谱响应法对大电流冲击后的中性点电抗器进行绕组变形试验, 对比试验开始前的绕组变形图谱显示前后两次波形一致, 试验前后绕组变形数据对比见图 6。经过该次大电流试验后, 电抗器本体绕组未发生变形。

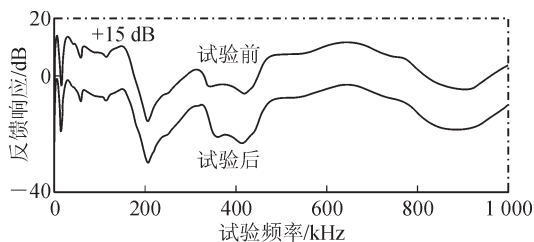


图 6 试验前后绕组变形数据对比

Fig. 6 Winding deformation data of experimental

对试验前后的中性点电抗器油色谱数据进行对比分析, 见表 6, 未见异常。

表 6 试验前后色谱数据对比

Table 6 Comparison of chromatographic data $\mu\text{L/L}$

时间	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
耐压 前	0.78	0.09	0.17	0.00	7.34	68.96	86.11
耐压 后	0.77	0.09	0.16	0.00	7.29	69.06	85.98

5 结语

文中以 1 000 kV 特高压工程中高压并联电抗器所装设的中性点小电抗现场匝间耐压试验为研究对象, 首先对中性点电抗器通过 ATP-EMTP 仿真, 针对特高压工程系统调试期间出现的中性点电抗器匝间绝缘击穿问题进行分析, 论述了现场匝间

耐压试验的重要性; 据此提出了中性点电抗器现场匝间耐压试验方案, 并根据匝间耐压试验方案中的理论计算数据, 对电抗器在相应电流下的动稳定性和热稳定性进行校核, 最后在现场试验中验证了试验方案的可行性, 实现了现场对中性点电抗器匝间绝缘的考核。

参考文献:

- [1] 陈 禾, 陈维贤. 并联电抗器中性点小电抗的选择[J]. 高电压技术, 2002, 28(8): 9-10.
CHEN He, CHEN Weixian. Choice of inductance on neutral of shunt reactor[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(8): 9-10.
- [2] 田 庆. ATP-EMTP 的交流特高压试验示范工程建模及仿真研究[J]. 湖北电力, 2007, 31(5): 19-21.
TIAN Qing. Modeling and simulation of UHV pilot project based on ATP-EMTP[J]. Hubei Electric Power, 2007, 31(5): 19-21.
- [3] 谷定燮, 李振强, 伍志荣. 1 000 kV 输电系统中性点小电抗过电压和绝缘水平[J]. 高电压技术, 2010, 38(2): 240-242.
GU Dingxie, LI Zhenqiang, WU Zhirong. Overvoltage and insulation level of neutral reactor on 1 000 kV transmission syetem[J]. High Voltage Engineering, 2010, 38(2): 240-242.
- [4] 田 庆. 特高压工程高抗中性点绝缘水平及小电抗选择[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 475-479.
TIAN Qing. Choice of neutral inductance and insulation level of shunt reactor neutral point in UHV AC pilot projec[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 475-479.
- [5] 郭小兵, 谭向宇, 朱 涛, 等. 故障位置和频率对干式空心并联电抗器参数的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 86-89.
GUO Xiaobing, TAN Xiangyu, ZHU Tao, et al. Influence of fault position and frequency on parameters of dry-type air-core shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 86-89.
- [6] 王 岩, 谭向宇, 陈 晶, 等. 电场对干式空心电抗器的绝缘性影响分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 78-81.
WANG Yan, TAN Xiangyu, CHEN Jing, et al. Analysis of the influence of electric field on the insulation of dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 37(6): 78-81.
- [7] GB 1094.3—2003 电力变压器第三部分: 绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙[S]. 2003.
GB 1094.3—2003 Power transformer, Part 3: Insulation level, insulation test and external insulation air gap[S]. 2003.
- [8] 赵健康, 欧阳本红. 高压电缆竣工试验变频耐压与工频耐压等效性研究[C]//第十三届全国工程电介质学术会议论文集. 西安: [s.n.], 2011: 406-410.
ZHAO Jiankang, OUYANG Benhong. Research on equivalence between frequency convesion voltage withstand and power frequency compression test in high voltage cable

- completion test[C]//13th National Symposium on Engineering Dielectric. Xi'an:[s.n.],2011:406-410.
- [9] 王赞基,杨钰.大型电力变压器线圈中特快速暂态电压分布的计算[J].高电压技术,2010,36(4):918-925.
WANG Zanji,YANG Yu. Calculation of very fast transient overvoltage distributions in large power transformer windings[J]. High Voltage Engineering,2010,36(4):918-925.
- [10] 王晓晖,董华英,梁贵书,等. VFTO 下变压器绕组的 EMTF 模型[J]. 高电压技术,2006,32(3):4-6.
WANG Xiaohui,DONG Huaying,LIANG Guishu,et al. High frequency EMTF model of transformer windings[J]. High Voltage Engineering,2006,32(3):4-6.
- [11] 杨爱民,高树国,张重远,等. 变压器绕组内 VFTO 波过程的建模与计算[J]. 高电压技术,2007,33(5):22-24.
YANG Aimin,GAO Shuguo,ZHANG Chongyuan,et al. Modeling and calculation of the wave process in transformer windings under VFTO[J]. High Voltage Engineering,2007,33(5):22-24.
- [12] 张喜乐,梁贵书,孙海峰,等. VFTO 作用下变压器绕组的过电压计算[J]. 高电压技术,2005,31(8):4-6.
ZHANG Xile,LIANG Guishu,SUN Haifeng,et al. Computation of very fast transient overvoltages in transformer windings[J]. High Voltage Engineering,2005,31(8):4-6.
- [13] 律方成,杜兴伟,刘云鹏,等. 基于 ATP-EMTP 对中性点直接接地系统铁磁谐振的仿真和消谐措施研究[J]. 华北电力大学学报,2006,33(2):1-4.
LYU Fangcheng,DU Xingwei,LIU Yunpeng,et al. Simulation and resonance-erasing measurement for ferroresonance of neutral grounding system based on ATP-EMTP[J]. Journal of North China Electric Power University,2006,33(2):1-4.
- [14] 洛君婷,谢德馨,李晓峰,等. 变压器绕组导线对抗短路能力的影响[J]. 变压器,2010,47(5):16-18.
LUO Juntong,XIE Dexin,LI Xiaofeng,et al. Influence of conductor in transformer winding to ability to withstand short circuit[J]. Transformer,2010,47(5):16-18.
- [15] 王欣伟,连建华,俞华,等. 电力变压器内绕组辐向抗短路能力的计算与分析[J]. 变压器,2013,50(1):8-11.
WANG Xinwei,LIAN Jianhua,YU Hua,et al. Calculation and analysis of radial ability to withstand short circuit of inner winding in power transformer[J]. Transformer,2013,50(1):8-11.
- [16] 刘军,张安红. 电力变压器绕组短路动稳定能力的仿真和评估[J]. 变压器,2012,49(6):14-25.
LIU Jun,ZHANG Anhong. Simulation and evaluation of short circuit dynamic stability of windings of power transformer[J]. Transformer,2012,49(6):14-25.
- [17] 赵志刚,李光范,李金忠,等. 基于有限元法的大型电力变压器抗短路能力分析[J]. 高电压技术,2014,40(10):3214-3220.
ZHAO Zhigang,LI Guangfan,LI Jinzhong,et al. Analyzing the short circuit withstanding ability of large power transformer based the FEM method[J]. High Voltage Engineering,2014,40(10):3214-3220.
- [18] 闫振华,马波,马飞越,等. 220 kV 电力变压器短路动力学性能分析[J]. 高压电器,2014,50(3):79-82.
YAN Zhenhua,MA Bo,MA Feiyue,et al. Dynamic performance analysis of winding for 220 kV power transformer with short circuit[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(3):79-82.
- [19] 王世山,李彦明. 电力变压器绕组电动力分析计算[J]. 高压电器,2002,38(4):22-25.
WANG Shishan,LI Yanming. Computation of electrodynamic force on windings of power transformer[J]. High Voltage Apparatus,2002,38(4):22-25.
- [20] MUTHANNA K T,SARKAR A,DAS K,et al. Transformer insulation life assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):150-156.
- [21] AHN H M,LEE J Y,KIM J K,et al. Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2011,47(3):1267-1272.
- [22] AHN H M,OH Y H,KIM J K,et al. Experimental verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2012,48(2):819-822.
- 李予全(1985—),男,工程师,硕士研究生,研究方向为变压器现场试验技术。

(上接第 37 页)

- [24] 阮全荣,李晖,刘国锋,等.高落差垂直竖井GIL隔室设置的研究[J]. 高压电器,2010,46(8):52-55.
RUAN Quanrong,LI Hui,LIU Guofeng,et al. Research on arrangement of GIL compartment in high drop vertical shaft[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(8):52-55.
- [25] BENATO R,DUGHIERO F,FORZAN M,et al. Proximity effect and magnetic field calculation in GIL and in isolated phase bus ducts[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2002,38(2):781-784.
- 庞庆平(1964—),男,硕士,高级工程师,主要从事高压开关设备技术研究及产品研发工作。
- 郭煜敬(1980—),男,博士,高级工程师,主要从事高压开关设备技术研究及产品研发工作。
- 金光耀(1982—),男,本科,工程师,主要从事高压开关设备技术研究及产品研发工作。