

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.09.028

特高压干式平波电抗器损耗与热点温升计算及试验研究

肖彩霞¹, 李琳¹, 纪锋², 高冲^{2,3}

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 全球能源互联网研究院, 北京 102209;
3. 先进输电技术国家重点实验室, 北京 102209)

摘要: 为综合分析特高压直流输电用干式平波电抗器的损耗与温升, 获得其热点位置与热点温升, 文中推导了平波电抗器各个包封中直流电流损耗与谐波电流损耗分布的计算方法。针对一台 ± 800 kV/4 000 A特高压干式平波电抗器, 分析了加载等效直流电流的温升试验工况下电抗器的损耗分布与实际运行中包含谐波损耗的损耗分布的差异。对温升试验工况下特高压干式平波电抗器的温度场进行了计算, 获得其温升分布, 通过相应的温升试验, 验证了仿真计算结果的可靠性; 最后, 比较了运行工况与温升试验工况下特高压干式平波电抗器的温升分布的差异。结果表明: 简单地应用等效直流温升试验来研究平波电抗器热点温升的方法是不合理的; 应该大力研究混频电流的加载, 提高温升试验的精确度。

关键词: 特高压直流输电; 平波电抗器; 损耗分布; 温升试验; 热点温升

Calculation and Test of the Loss and Hot-point Temperature Rise of the UHV Dry-type Smoothing Reactor

XIAO Caixia¹, LI Lin¹, JI Feng², GAO Chong^{2,3}

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China;
3. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Beijing 102209, China)

Abstract: To analyze the loss and temperature rise of the dry-type smoothing reactor in UHVDC transmission system and obtain the hot-point location and hot-point temperature rise, we develop a calculation method of DC current loss and harmonic current loss distributions in each winding package of the smoothing reactor. Taking a ± 800 kV/4 000 A UHV dry-type smoothing reactor for example, we analyze the difference of the loss distributions between the temperature rise test condition under equivalent DC current and the operation condition containing harmonic current loss. We obtain the temperature rise distribution through temperature field calculation in the condition of temperature rise test, and verify the reliability of the simulation calculation results through corresponding temperature rise test. Moreover, we compare the difference of the temperature rise distributions between the practical operation condition and the temperature rise test condition, and the results show that the research of the hot-point temperature rise of a smoothing reactor only by the temperature rise test under equivalent DC current is not reasonable. It is necessary to focus on the study of loading frequency-mixing current to improve the accuracy of the temperature rise test.

Key words: UHVDC transmission; dry-type smoothing reactor; loss distribution; temperature rise test; hot-point temperature rise

0 引言

特高压干式平波电抗器是特高压直流输电工程的最重要设备之一, 对于限制逆变侧电压崩溃时

的过电流、平抑传输直流电流中的纹波、防止沿直流线路入侵到换流站的过电压等具有重要作用^[1]。温升是绝缘材料老化的主要原因, 也是检验干式空心平波电抗器长期稳定运行的重要设计指标之

一。而产生温升的最主要热源是电抗器的电流损耗,因此,准确地分析电抗器的损耗分布,进而掌握热点温度与热点位置对干式空心电抗器的优化设计,有效监测电抗器温升以及预防过热故障具有重要指导意义。

目前,国内外学者对于干式平波电抗器的相关研究主要集中在电感计算^[2]、布置方式^[3-4]、技术规范^[5]、场域分析^[6-10]、损耗分析^[11]、温升研究^[12-14]、振动与噪声研究^[15-16]、过电压研究^[17-18]、抗震特性分析^[19-21]等方面。在干式平波电抗器损耗和温升的研究方面,主要关注直流损耗以及在直流损耗作用下电抗器温升的分布,而对交流损耗以及其对温升分布的影响并没有足够的重视。实际运行中,平波电抗器承受的交流谐波损耗会引起热点的位移。目前,平波电抗器的设计主要是通过增大温升的设计裕量,以及提高温升试验中的直流电流来保障产品的安全性^[22]。文[11]对电抗器的谐波损耗进行分离计算;文[12]也对特高压干式空心平波电抗器进行温升试验以及流固耦合温度场计算,但都没有对电抗器损耗与热点温升进行综合分析。

文中依据平波电抗器的等效电路及等效电路方程,推导了直流电流损耗与谐波电流损耗在平波电抗器各层包封分配的计算方法,以一台±800 kV/4 000 A干式空心平波电抗器为例,分析了实际运行与温升试验两种工况下的损耗分布;对该电抗器温升试验工况下的温度分布进行计算。采用GB/T 25092—2010标准中温升试验的方法,对温升试验工况下的温升计算结果的可靠性进行了验证。采用相同的仿真计算方法,计算电抗器在实际运行中的热点温度分布,对比分析了温升试验工况下电抗器温度分布与实际运行中电抗器温度分布的差异。

1 绕组谐波损耗计算

1.1 等效电路模型

特高压干式平波电抗器由 n 个同轴包封组成,每个包封都是由一根或多根并联的换位导线绕制而成;每根换位导线都是由多股单丝圆导线组合而成;包封之间由气道和撑条间隔,撑条起固定作用,气道则用以提高电抗器的散热性能。

干式平波电抗器各层包封在电气上为并联连接,其等效电路模型见图1。图1中; $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ 是每层包封的自感; $M_{1,2}, M_{1,3}, M_{1,4}, \dots$ 等是各层包封之间的互感; $R_1, R_2, \dots, R_n$ 为每层包封自身的电阻。

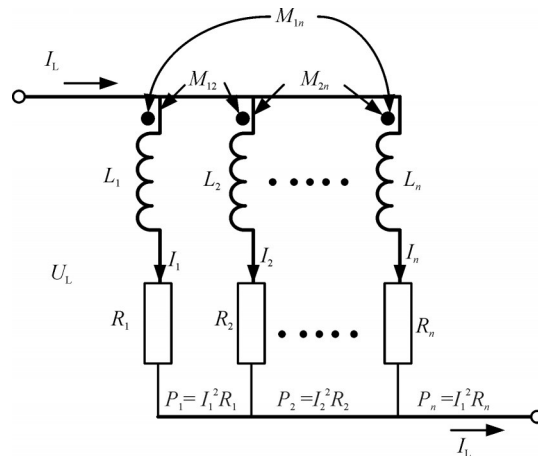


图1 平波电抗器的等效电路

Fig. 1 The equivalent circuit of smoothing reactor

干式平波电抗器的等效电路方程式如下

$$\begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_n \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_1 & M_{1,2} & \dots & M_{1,n} \\ M_{2,1} & L_2 & \dots & M_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n,1} & M_{n,2} & \dots & L_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_L \\ U_L \\ \vdots \\ U_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

或写为式(2)的矩阵形式

$$(K_R + j\omega K_L)I = U \quad (2)$$

式(2)中; ω 为角频率; I_i 为通过每层绕组的电流; U_L 是电抗器的电压降,由于各个包封是并联结构,所以每一个包封上的电压降均等于 U_L 。获得方程左端电抗矩阵的关键是自感和互感的计算,目前,电感的计算可以借鉴和参考感应系数法^[23]、Bartky变换法^[24]、矢量磁位法^[25]以及能量变换法等传统计算方法。

1.2 损耗分布的计算

一般来说,流过平波电抗器的直流电流和各次谐波电流由其所在系统条件决定,即给定的平波电抗器设计输入条件;而平波电抗器各层包封的设计则决定了电流在各层包封中的分布。电流损耗是平波电抗器的主要损耗,因此获得各个包封的电流分布便成为计算各层包封损耗的关键。

平波电抗器各层包封采用了并联结构,所以电流关系可以写为如式(3)所示的形式

$$I_L = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = P^T I \quad (3)$$

式(3)中: $I = [I_1, I_2, \dots, I_n]^T$; P 是一个 n 维列向量,其中的每个元素均等于1。

由式(2)可以得到式(4)

$$I = (K_R + j\omega K_L)^{-1} U \quad (4)$$

电压向量可以表示成

$$U = P U_L \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3)中,可以得到

$$I_L = P^T (K_R + j\omega K_L)^{-1} P U_L \quad (6)$$

求逆, 可得平波电抗器两端产生的电压为

$$U_L = \{P^T (K_R + j\omega K_L)^{-1} P\}^{-1} I_L \quad (7)$$

将式(5)、(7)代入式(2), 可以得

$$(K_R + j\omega K_L) I = P \{P^T (K_R + j\omega K_L)^{-1} P\}^{-1} I_L \quad (8)$$

流过干式平波电抗器的各次交流谐波电流 I_L 为已知量, 代入式(8), 可以得到各个包封中的电流值 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 。对于特高压平波电抗器来讲, 其每个包封的电阻值一般在 $0.2 \sim 1 \Omega$, 而其自感一般在 $0.1 \sim 0.15 \text{ H}$ 。当直流电流流过平波电抗器时, $\omega=0$, 式(8)中的 K_L 将不起作用, 电流仅按照电阻进行分流。而当交流谐波电流流过平波电抗器时, 由于直流系统中的谐波频率为 50 Hz 的倍频, 角频率 ω 至少为 314 rad/s , 式(8)中 K_L 将起主要作用, 电流将主要按照电感进行分配。

将计算得到的各个包封中的电流值 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 代入式(9)获得其在此频率下的损耗值 P_i 。

$$P_i = R_i I_i^2 \quad (9)$$

依次计算各次谐波电流下的谐波损耗分布, 再将各次谐波电流的损耗叠加在一起, 即可得到各个包封运行中的损耗分布。对于包封的直流电阻损耗可以按照 $\omega=0$ 的特殊情况进行计算。

1.3 算例分析

文中研究对象为一台 $\pm 800 \text{ kV}/4000 \text{ A}$ 干式空心平波电抗器, 包封层数为 24 层, 包封高度 $H=3.985 \text{ m}$ 。电感 75 mH , 额定直流电流 4000 A , 最大连续运行直流电流 4497 A , 允许 4731 A 直流下 2 h 过载, 可承受 30 kA 短时电流峰值。

使用 1.2 节所述方法对于干式平波电抗器在正常工作时的各线圈包封损耗进行计算, 得到该电抗器在额定直流电流和谐波电流作用下的损耗分布见图 2。由图 2 可以看出, 此台电抗器的谐波损耗主要集中在第 4、5 层包封上。

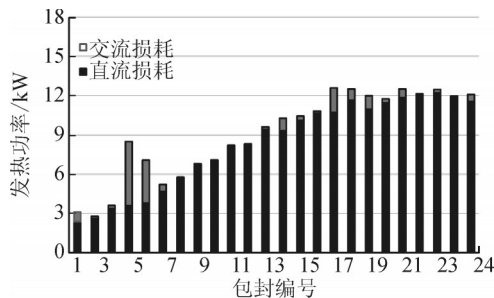


图2 实际运行中的绕组损耗分布

Fig. 2 The loss distribution of windings in the actual operation

目前, 在特高压直流输电用平波电抗器标准

中, 是通过提高直流温升试验的直流负载来等效平波电抗器的真实运行损耗的。温升试验时的各个线圈包封的损耗分布见图 3。比较图 2、3 可以看出, 在加载试验直流电流时, 损耗分布规律与实际运行中损耗分布差异较大: 在实际运行中, 第 4、5 层由于谐波电流的存在, 导致其损耗显著增加。

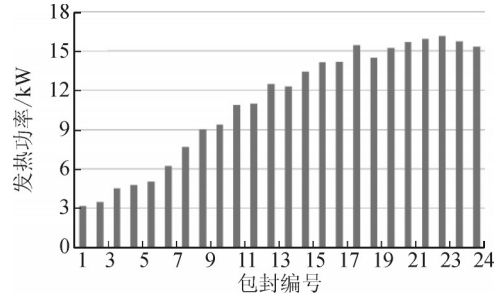


图3 温升试验中的绕组损耗分布

Fig. 3 The loss distribution of windings in the temperature rise test

2 温升试验工况下的温升计算

特高压干式空心平波电抗器采用自然对流方式散热, 电抗器与空气的传热满足热传导方程, 空气流动和传热遵循基本物理规律, 即满足质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律^[12]。空气在气道内流动散热, 每层包封有内外两层散热面, 因此, 电抗器包封的温度分布与气道内空气的流速, 气道的宽度以及单位散热面积损耗有关。

根据干式空心平波电抗器的本体结构特点和传热特性, 建立电抗器 1/2 的立三维流场与温度场的求解域模型, 见图 4。图 4 中, 对称面为绝热面。计算时, 星型支架和支撑件的体积较小, 星型支架和撑条的厚度很薄, 忽略不计, 环境温度为 $19.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

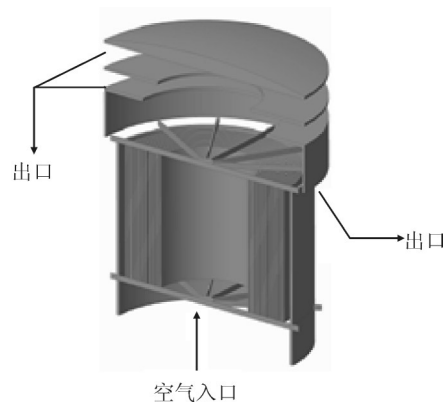


图4 求解域计算模型

Fig. 4 Physical model of solution region

实际运行中, 特高压直流输电用干式平波电抗器的主要损耗热源为直流电阻损耗和各次谐波电

流的电阻性损耗。受目前的试验条件限制,在进行温升试验时,加载混频电流十分困难,因此,施加与实际损耗等效的温升试验等效直流电流 I_1 。 I_1 可由式(10)计算得到

$$I_1 = \sqrt{\left(I_d^2 \times R_{dc80} + \sum_{i=1}^{50} I_i^2 \times R_{h80} \right) / R_{dc80}} \quad (10)$$

式(10)中: I_d 为直流电流; I_i 为各次谐波电流; R_{dc80} 为80℃下的直流电阻; R_{h80} 为80℃下的各次谐波电流等效的交流电阻。

加载温升试验时等效直流电流4 600 A,通过第1节中所述方法计算出包封的直流电阻损耗,从而得到每层包封的等效体积热源密度,以此作为温升计算的损耗热源。电抗器各层包封温度分布见图5。由图5可以看出,计算区域热点温度为81℃,热点温升为61.5℃,均匀分布于第10层到第20层;平均温升为57.5℃。

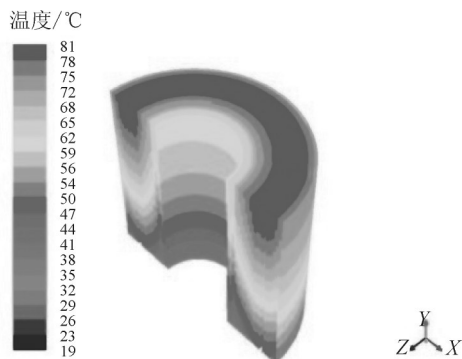


图5 电抗器各层包封温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of all encapsulations of reactor

3 试验验证

3.1 试验方案

为验证第2节中仿真结果的可靠性,对文中论述的特高压干式平波电抗器进行温升试验。受实验条件的制约,温升试验中施加等效直流电流。

该±800 kV特高压干式平波电抗器温升试验线路见图6。试验中电抗器加装隔声罩,防雨罩等装置;每层包封均匀布置3个测温点,见图7,每个测温点位于每层包封的外表面,距离包封上端面20 cm。试验开始时,采用分级增加流的方式,直至等效温升试验电流:第一级施加2 000 A直流电流4 h;第二级施加3 000 A直流电流;第三级施加4 600 A直至温升数据稳定。读取每层包封所有测温点的温升,取其平均值作为该层包封的温升值。温升试验环境温度为19.5℃,其他条件均符合GB/T 25092—2010标准中的要求。

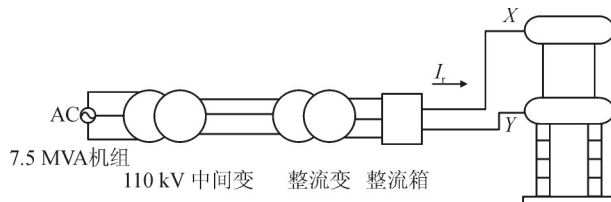


图6 试验线路图

Fig. 6 The circuit diagram of test

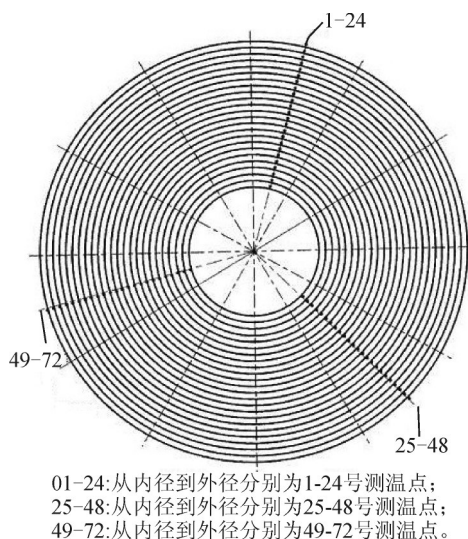


图7 测温点的布置图(俯视图)

Fig. 7 The arrangement of temperature measuring points (vertical view)

3.2 试验结果

试验测得的温度分布与仿真结果对比见图8,试验中电抗器的热点温度为84.4℃,位于电抗器的第13层包封处;仿真计算中,电抗器的热点温度81℃,均匀分布在电抗器的第10-20层;前7层包封和第24层包封两者的温差值较大,第8-23层包封的温差均在5℃以内。造成以上温差的主要原因有:内部消音器的影响;仿真计算中,结构模型的简化以及边界条件的简化;撑条的影响以及试验环境条件差异等。试验结果与仿真结果最大相对误差12.1%,平均相对误差3.9%,仿真结果与试验结果比较吻合。

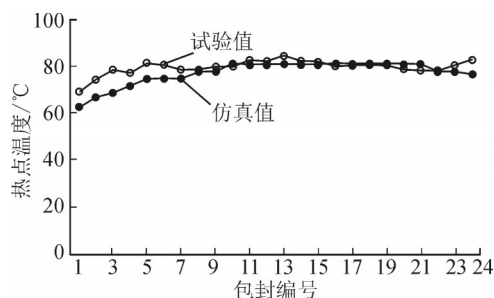


图8 温升试验中各层包封温度对比

Fig. 8 The temperature comparison of all encapsulations of reactor

4 实际运行工况下的温升计算

实际运行中,特高压干式平波电抗器流过额定直流电流和各次谐波电流,直流电流按照电阻进行分流,而各次谐波电流按照电感进行分流。第2节中温升计算与第3节中温升试验均是以与实际损耗等效的等效温升试验电流作为损耗热源,第1.3节中分析了等效直流电流与实际运行两种工况下的损耗分布差异。为分析谐波电流损耗对电抗器温度分布的影响,采用第1节中叙述的损耗分布计算方法,以额定直流电流损耗与各次谐波电流损耗之和作为损耗热源,计算出电抗器各层包封等效的损耗热源密度,以此损耗热源密度作为实际运行工况下温升计算的损耗热源。保持环境温度为19.5℃。电抗器各层包封温度分布见图9。由图9可以看出,计算区域热点温度为81.4℃,热点温升为61.9℃;平均温升为57.5℃。提取图5、9中各层包封的热点温度,各层包封的热点温度对比见图10。由图10可以看出,电抗器热点温升基本不变,但是热点发生了位移。实际运行中,电抗器流过直流电流与谐波电流,谐波电流按照电感分布。谐波电流产生谐波损耗,因此,电抗器的热点位置由第10-20层转移到第4层。

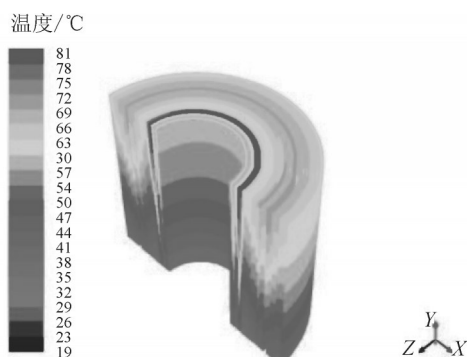


图9 实际工况下电抗器各层包封温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of all encapsulations of reactor

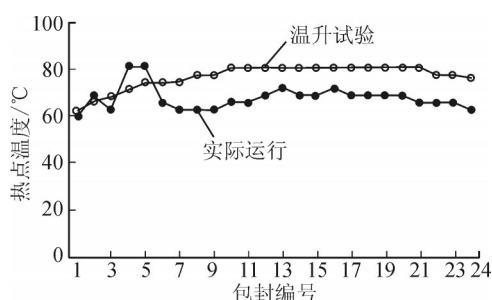


图10 各层包封温度对比

Fig. 10 The temperature comparison of all encapsulations of reactor

通常,对于干式平波电抗器的绝缘性能威胁最大的是热点温升,而不是平均温升,从图10可以看出,在实际运行工况下,此台平波电抗器的热点出现在第4、5层包封上,同时热点温升要远远高于平均温升,这是由第4、5层包封上集中了太多的谐波损耗造成的;谐波损耗的分布不均匀是由平波电抗器各个线圈包封的设计决定的。而在直流温升试验中通过增加直流负载来等效实际运行工况下平波电抗器温升的做法,更多的是提高了平波电抗器平均温升,并非完全等效实际运行工况下的平波电抗器温度分布。

5 结论

1)推导了特高压直流输电用平波电抗器直流损耗与谐波损耗分布的计算方法,并对一台 ± 800 kV/4 000 A干式空心平波电抗器的损耗分布进行计算分析;

2)对所述电抗器温升试验工况下的温度分布进行了计算,并通过温升试验,验证了计算结果的可靠性;以同样的计算方法,计算出实际运行中电抗器的温度分布;

3)实际运行工况与直流温升试验工况的电抗器绕组总损耗一致,但是损耗分布和热点分布差异很大,因此不能简单地应用温升试验电流研究特高压干式平波电抗器的热点温升;

4)目前,由于试验条件的制约,特高压干式平波电抗器的温升试验均采用等效直流电流作为损耗热源,而无法加载实际运行中流过的直流电流与各次谐波电流,因而无法等效实际运行工况。可以大力研究混频电流的加载,提高温升试验的精确度。

参考文献:

- [1] 赵晓君,谢国恩,曾南超,等. 高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
ZHAO Wanjun, XIE Guo'en, ZENG Nanchao, et al. HVDC transmission technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 刘志刚,王建华,耿英三,等. 干式空心电抗器磁场与电感的计算分析[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 7-11.
LIU Zhigang, WANG Jianhua, GENG Yingsan, et al. The calculation of magnetic field and inductance of dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(3): 7-11.
- [3] 雷园园,赵现平. ± 800 kV云广直流输电工程平波电抗器参数选择和布置方案[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 75-79.
LEI Yuanyuan, ZHAO Xianping. Parameters selection and

- arrangement of smoothing reactors for ± 800 kV Yunnan-Guangzhou UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6):75-79.
- [4] 张月华,刘成柱,张 猛,等. ± 1100 kV 特高压干式平波电抗器支撑结构研究[J]. 变压器, 2015, 52(6):24-32.
ZHANG Yuehua, LIU Chengzhu, ZHANG Meng, et al. Research on support structure of ± 1100 kV UHV dry-type smoothing reactor[J]. Transformer, 2015, 52(6):24-32.
- [5] 乐 波,张燕秉,郑 劲,等. ± 800 kV 直流干式平波电抗器的技术规范[J]. 高电压技术, 2006, 32(12):170-173.
YUE Bo, ZHANG Yanbing, ZHENG Jin, et al. Study on the technical specification of ± 800 kV UHVDC dry-type smoothing reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 32(12):170-173.
- [6] 周光远,余 轶,蓝 磊,等. ± 800 kV 干式平波电抗器周围电场三维仿真[J]. 武汉大学学报, 2014, 47(6):833-837.
ZHOU Guangyuan, YU Yi, LAN Lei, et al. Three-dimensional simulation of electric field around ± 800 kV dry-type smoothing reactor[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(6):833-837.
- [7] 王清璞,李文平,孙优良,等. ± 800 kV 干式平波电抗器计算和场域分析[J]. 变压器, 2007, 44(5):1-5.
WANG Qingpu, LI Wenping, SUN Youliang, et al. Calculation and field analysis of ± 800 kV dry-type smoothing reactor[J]. Transformer, 2007, 44(5):1-5.
- [8] 王建民,景崇友,武卫革,等. 特高压干式平波电抗器电流分布和漏磁场特性的数值分析[J]. 变压器, 2010, 47(8):21-23.
WANG Jianmin, JING Chongyou, WU Weige, et al. Numerical analysis of current distribution and leakage magnetic field characteristics of EHV dry-type smoothing reactor[J]. Transformer, 2010, 47(8):21-23.
- [9] 张 宁,李 琳. 35 kV 空心电抗器工频磁场最优抑制方式的研究分析[J]. 高压电器, 2015, 51(8):125-130.
ZHANG Ning, LI Lin. Research analysis of the optimal inhibition of power frequency magnetic field of 35 kV air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):125-130.
- [10] 徐禄文,罗 鹏,邹岸新,等. 基于矩量法的空心电抗器工频磁场仿真分析[J]. 高压电器, 2015, 51(7):26-31.
XU Luwen, LUO Peng, ZOU Anxin, et al. Analysis of power frequency magnetic field simulation of air core reactor based on the method of moments[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7):26-31.
- [11] 曾林锁,张良县,谢德馨. 特高压干式平波电抗器谐波损耗分离计算[J]. 变压器, 2011, 48(4):6-9.
ZENG Linsuo, ZHANG Liangxian, XIE Dexin. Separation calculation of harmonic loss of EHV dry-type smoothing reactor[J]. Transformer, 2011, 48(4):6-9.
- [12] 姜志鹏,文习山,王 羽,等. 特高压干式空心平波电抗器温度场耦合计算与试验[J]. 中国电机工程学报, 2014, 35(20):5344-5350.
JIANG Zhipeng, WEN Xishan, WANG Yu, et al. Test and coupling calculation of temperature field for UHV dry-type air-core smoothing reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 35(20):5344-5350.
- [13] 孟 波,马 骁,王海涛,等. 干式空心滤波电抗器的温升及试验分析[J]. 变压器, 2013, 50(8):33-36.
MENG Bo, MA Xiao, WANG Haitao, et al. Analysis of temperature rise and test of dry-type air core filter reactor[J]. Transformer, 2013, 50(8):33-36.
- [14] 夏天伟,曹云东,金 巍,等. 干式空心电抗器温度场分析[J]. 高电压技术, 1999, 25(4):86-88.
XIA Tianwei, CAO Yundong, JIN Wei, et al. The analysis of temperature field in dry air core reactor[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4):86-88.
- [15] LILIE J L. Acoustic noise generated by air power reactor in open-air substation[J]. European Transactions on Electrical Power, 2006, 16(3):297-310.
- [16] MARCIN H. Noise analysis of high voltage capacitors and dry-type air-core reactors[D]. Helsinki: Aalto University, 2013.
- [17] 周 浩,王东举. ± 1100 kV 特高压直流换流站过电压保护和绝缘配合[J]. 电网技术, 2012, 36(9):1-8.
ZHOU Hao, WANG Dongju. Overvoltage protection and insulation coordination for ± 1100 kV UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2012, 36(9):1-8.
- [18] 陈水明,杨鹏程,耿屹楠,等. ± 800 kV 平波电抗器的雷电过电压耐受[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(1):23-26.
CHEN Shuiming, YANG Pengcheng, GENG Yinan, et al. Lightning overvoltage withstand of ± 800 kV smoothing reactor[J]. Journal of Tsinghua University(Philosophy and Social Sciences), 2010, 50(1):23-26.
- [19] 苟烜齐,刘轩东,杨 昊,等. 匝间绝缘故障对干式空心电抗器电感参数影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10):117-121.
GOU Xuanji, LIU Xuandong, YANG Hao, et al. Simulation study of the influence of turn-to-turn insulation fault on inductance of dry-type air-core reactors[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10):117-121.
- [20] 范书立,陈健云,李 静. 特高压干式平波电抗器的抗震性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2013, 26(2):226-231.
FAN Shuli, CHEN Jianyun, LI Jing. Experimental investigation on aseismic behavior of ultra-high voltage dry-type smoothing reactor[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(2):226-231.
- [21] 王黎明,汪 创,傅观君,等. 特高压直流平波电抗器的复合支柱绝缘子抗震特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(9):2081-2088.
WANG Liming, WANG Chuang, FU Guanjun, et al. Anti-seismic characteristics of composite post insulators for smoothing

- 1629-1634.
CHANG Wenzhi, TANG Zhiguo, LI Chengrong, et al. Simulation analysis of PD UHF signal propagation in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1629-1634.
- [23] 侯慧娟, 盛戈皞, 苗培青, 等. 基于超高频电磁波变电站局部放电空间定位[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1334-1340.
HOU Huijuan, SHENG Gehao, MIAO Peiqing, et al. Partial discharge location based on radio frequency antenna array in substation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1334-1340.
- [24] 张磊, 林群, 丁登伟, 等. GIS中局部放电特高频信号传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 726-731.
ZHANG Lei, LIN Qun, DING Dengwei, et al. Simulation analysis on the attenuation characteristics of partial discharge ultra-high frequency signals in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 726-731.
- [25] 叶海峰, 钱勇, 满玉岩, 等. 基于暂态地电压的开关柜局部放电仿真研究[J]. 高压电器, 2013, 48(7): 13-17.
YE Haifeng, QIAN Yong, MAN Yuyan, et al. Simulation analysis of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 48(7): 13-17.
- [26] 张淑娥, 赵君超, 李永倩, 等. 空气湿度微波谐振腔测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 27-32.
ZHANG Shu'e, ZHAO Junchao, LI Yongqian, et al. Method for air humidity measurement based on microwave resonant cavity[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 27-32.

张忆(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备局部放电检测与仿真计算。

宋辉(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为输变电设备状态监测与智能化。

(上接第182页)

- ing reactors on UHVDC[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2081-2088.
- [22] 高压直流输电用干式空心平波电抗器: GB/T 25092—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Dry-type air-core smoothing reactors for HVDC applications: GB/T 25092-2010[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2010.
- [23] 卡兰塔罗夫, 采依特林. 电感计算手册[M]. 陈汤铭, 刘保安, 译. 北京: 机械工业出版社, 1992: 208-372.
KARANROVE, KUYTLIN. Inductance calculation manual[M]. CHEN Tangming, LIU Baoan, translated. Beijing: China Machine Press, 1992: 208-372.
- [24] FAWZI T H, BURKE P E. The accurate computation of self and mutual inductances of circular coils[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1978, 97(2): 464-468.
- [25] 陈乔夫, 李湘生. 空心电力电抗器的电感计算[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(4): 11-15.
CHEN Qiaofu, LI Xiangsheng. Calculation of inductance of air-core reactor[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1994, 22(4): 11-15.

肖彩霞(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事特高压直流干式平波电抗器的设计与计算分析。

李琳(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场理论及其应用和电力系统电磁兼容。

纪锋(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压直流输电领域研究。

高冲(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事直流输电技术和直流电网研究。