

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.12.027

±800 kV 直流分压器校准分析计算模型研究与应用

王 奇, 谭炳源, 刘青松, 吴 瀛, 罗 磊

(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心, 广州 510670)

摘要: 直流分压器是特高压直流输电系统中不可缺少的主设备, 其采集数据的准确性对电网的安全稳定运行至关重要。基于直流分压器的工作原理, 分析致使直流分压器分压比变化的主要因素, 通过数学公式直观的诠释分压比的不确定性, 然后在研究分压比不确定性的基础上构建直流分压器校准分析计算模型, 并试验证明了该模型对站用±800 kV 直流分压器的校准水平高达 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级, 大幅度提升了直流分压器量值测量的准确度。

关键词: ±800 kV; 直流分压器; 标准分压器; 校准模型; 校准试验

Calibration Model for ±800 kV DC Divider

WANG Qi, TAN Bingyuan, LIU Qingsong, WU Ying, LUO Lei

(EHV Maintenance & Test Center, China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510670, China)

Abstract: To improve the data acquisition accuracy of a DC voltage divider in UHVDC transmission system, the main factors influencing the voltage division ratio of the DC divider are analyzed according to its working principle. The uncertainty of the voltage division ratio is explained via mathematical formula. On the basis of studying the uncertainty of the partial pressure ratio, a calibration model of DC voltage divider is constructed. Test proves that the calibration level of the ±800 kV DC voltage divider is up to $10^{-5} \sim 10^{-6}$, which means a significant improvement in the measurement accuracy of the DC voltage divider.

Key words: ±800 kV; DC voltage divider; standard divider; calibration model; calibration test

0 引言

目前, 中国是世界上拥有直流输电工程数量最多、输送线路最长、输送电压等级最高的国家, 并且直流输电系统已经具有±800 kV 电压等级输送能力。获得直流高电压最普遍的方法是使用直流分压器, 它是直流输电系统中不可缺少的主设备, 承担着电能计量、电量监测、继保信号传送等的重要作用, 其采集数据的准确性对于电网的安全运行作用也至关重要^[1-2]。

随着测量电压的逐步升高, 直流分压器分压比随电压的相对变化也越来越凸显, 直接影响了测量结果的准确性, 这种变化量称为分压比电压系数。国内外研究成果表明, 电阻元件特性、泄漏电流、外部

环境、电晕电流、操作过电压等都是影响分压比的重要因素, 随着电压等级的提高, 这些因素的影响效果增强, 很难通过理论分析得到全电压范围内的分压比电压系数。要在更高电压等级下得到分压比的量值大小, 关键是评定出分压比的电压系数^[2-3]。当前电力行业中比较有效的方法是在分压器实际工作电压下进行试验测量, 通过分析、计算测量结果评定出全电压范围内的分压比电压系数。文中提出了一种基于试验测量的直流分压器校准分析计算模型, 采用多层对比分析的思维模式, 简化数据处理过程, 对分压比电压系数的评定更准确。

1 直流分压器工作原理

直流分压器比例标准采用电阻分压原理, 作为重要的高压计量设备, 在满足一定准确度的要求下,

收稿日期: 2017-06-24; 修回日期: 2017-08-26

其主要作用是将需要测量的一次侧极线直流高压按照一定比例转换成满足二次侧测量系统要求的低压信号,保证直流输电系统安全、可靠、稳定的运行,直流分压器的工作原理见图 1。图 1 中: U 为高压侧输入电压; u 为低压侧输出电压; R_h 为高压臂电阻; I_h 为流过高压臂的等效电流; R_l 为低压臂电阻; I_l 为流过低压臂的等效电流^[3]。

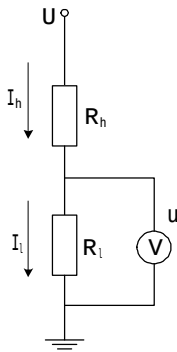


图 1 直流分压器工作原理图

Fig.1 The working principle of DC voltage divider

长期运行经验表明,泄漏电流和电晕电流不仅会引起直流分压器分压比量值变化,常常致使直流分压器故障,为了减小电晕泄漏,降低空间电导电流,直流分压器在结构设计上增加了屏蔽电阻层。现场用 ± 800 kV 标准直流分压器基本结构见图 2,屏蔽层位于绝缘外壳与测量层之间,电阻均匀分布,屏蔽层与测量层采用并联接线方式连接,直流分压器内部分压均匀,形成局部等电位环境,用来增强分压器对外部环境的抗干扰性,同时降低测量层电阻元件表面的电场强度,大大提高了直流分压器运行的稳定性。测量层电阻 R 和屏蔽层电阻 r 均使用电压系数和温度系数都很小的金属膜电阻, I_g 为沿绝缘外壳的泄漏电流^[24]。

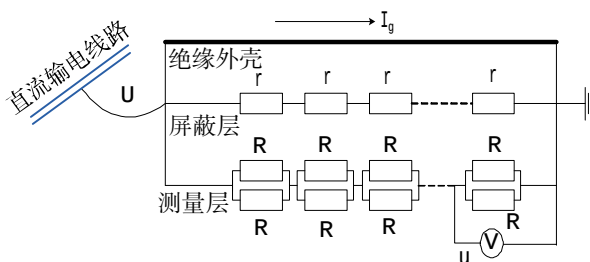


图 2 现场用 ± 800 kV 标准直流分压器基本结构

Fig. 2 Field with ± 800 kV standard DC divider basic structure

2 分压比的不确定性

假设图 1 中 R_h 和 R_l 为理想电阻,阻值大小固定不变,且不考虑泄漏电流和电晕电流等因素的影响,分压器的分压比为 $\frac{R_h+R_l}{R_l}$,是一个定量。但是实

际中,理想电阻是根本不存在的,电阻阻值会随着施加在电阻两端电压的变化而发生改变,分压比成为一个变量,这种现象称为分压比的不确定性。其中,电阻的电压系数和温度系数是引起直流电压器分压比变化的主要因素。然而,电阻的这种不稳定性难以彻底规避,在高压直流电压比例标准中使用的测量电阻元件,额定工作电压一般为 1 000 V 左右,同时为了减小泄漏电流的影响,额定工作电流一般不小于 0.1 mA,因此,电阻额定工作功率将大于 0.1 W,必定导致电阻导体发热,电阻阻值也会随着自身温度的变化而改变^[5-6]。

由于影响直流分压器分压比的因素众多,为了深入分析分压比的不确定性,首先考虑泄漏电流和电晕电流的影响,则有 $I_h \neq I_l$,直流分压器的分压比 K 可表示为

$$K = \frac{I_h R_h + I_l R_l}{I_l R_l} \quad (1)$$

假设分压器在相同电压下,泄漏电流和电晕电流是一个定量,则 I_h/I_l 可以表示为电压 U 的函数

$$I_h/I_l = [1 + \Delta k(U)] \quad (2)$$

考虑电阻阻值会随着施加在电阻两端电压的变化而发生改变,电阻 R 也可以表示成电压 U 的函数

$$R(U) = R_0 [1 + r(U)] \quad (3)$$

式(3)中: R_0 是电压为 U_0 时的电阻阻值; $r(U)$ 是电压为 U 时电阻的相对变化量。

因此,结合式(1)-(3)可知,分压比 K 可以表示为 U 的函数

$$K(U) = \frac{[1 + \Delta k(U)] R_{h0} [1 + r_h(U)] R_{l0} [1 + r_l(U)]}{R_{l0} [1 + r_l(U)]} = \frac{R_{h0} [1 + r_h'(U)] + R_{l0} [1 + r_l(U)]}{R_{l0} [1 + r_l(U)]} \quad (4)$$

式(4)中, $r_h'(U) = \Delta k(U) + r_h(U) + \Delta k(U) r_h(U)$ 。

通过数学公式直观的诠释直流分压器分压比的不确定性,不仅包含泄漏电流和电晕电流对分压比的影响,还包含了电阻特性对分压比的影响,为后续进一步研究直流分压器量值溯源方法提供依据^[7]。

3 校准分析计算模型

电压系数是分压比与工作电压的相关性参数,随着直流电压等级的升高,想要得到直流分压器分压比的量值大小,关键是准确评估分压比的电压系数。笔者充分考虑泄漏电流、电晕电流以及电阻特性因素的影响,在研究分压比不确定性的基础上通过构建直流分压器校准分析计算模型,对分压比电压系数进行更加全面评估计算^[8-9]。

选取 1、2、3 号标准分压器与 4 号被测分压器构

建校准分析计算模型,其中,3号分压器为1、2号分压器串联组合而成,由于1、2号分压器为同型号,且在电压由 U 升高至 $2U$ 时,1、2号分压器串联后的工作电压均为 U ,因此,在确保分压器工作电压不变的条件下,基本认为1、2号分压器串联前后的工作状态也保持不变。另外,四台分压器的额定分压比均相同,1、2号分压器的额定电压为 U ,3、4号分压器的额定电压为 $2U$, $R_1=R_3=\frac{1}{2}R_5=R$, $R_2=R_4=\frac{1}{2}R_6=r$,见图3。

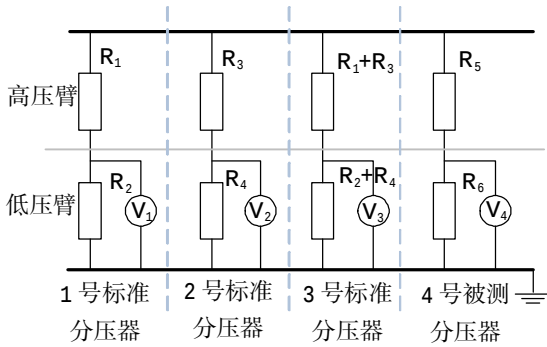


图3 直流分压器校准分析计算模型

Fig. 3 Calibration analysis calculation model of DC voltage divider

令: $r_1(U)$ 、 $r_2(U)$ 、 $r_3(U)$ 、 $r_4(U)$ 、 $r_5(U)$ 、 $r_6(U)$ 分别为电阻 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 r_5 、 r_6 随电压 U 的相对变化量; $K_1(U)$ 、 $K_2(U)$ 、 $K_3(2U)$ 、 $K_4(2U)$ 分别为1-4号分压器在额定电压下的分压比; $b_1(U)$ 、 $b_2(U)$ 、 $b_3(2U)$ 、 $b_4(2U)$ 分别为1-4号分压器分压比倒数的电压系数^[10-13]。

当电压 U_0 足够小时,认为分压器电阻阻值均未发生变化,令 $r/(R+r)=m$,且 $R \gg r$,根据式(4)可得

$$\frac{1}{K_1(U)} = \frac{r[1+r_2(U)]}{R[1+r_1'(U)]+r[1+r_2(U)]} \approx m \left[\frac{1+r_2(U)}{1+r_1'(U)} \right] \approx m[1-r_1'(U)+r_2(U)] = m[1+b_1(U)]. \quad (5)$$

同理可得:

$$\frac{1}{K_2(U)} = m[1+b_2(U)]; \quad (6)$$

$$\frac{1}{K_3(2U)} = m[1+b_3(2U)]; \quad (7)$$

$$\frac{1}{K_4(2U)} = m[1+b_4(2U)]. \quad (8)$$

其中, $b_3(2U) =$

$$-\frac{r_1'(U)+r_3'(U)}{2} + \frac{r_2(U)+r_4(U)}{2}. \quad (9)$$

根据图3中的接线方式,分别用1-3号标准分压器校准4号分压器,令 $e_1(U)$ 、 $e_2(U)$ 、 $e_3(2U)$ 分别为3次校准测量的相对误差,则有

$$e_1(U) = \frac{\Delta U}{u} \approx \left[\frac{U}{K_4(U)} - \frac{U}{K_1(U)} \right] / \frac{U}{K_4(U)} =$$

$$1 - \frac{m[1+b_1(U)]}{m[1+b_4(U)]} \approx b_4(U) - b_1(U). \quad (10)$$

同理可得:

$$e_2(U) \approx b_4(U) - b_2(U); \quad (11)$$

$$e_3(U) \approx b_4(2U) - b_3(2U). \quad (12)$$

由式(9)可得

$$b_3(4U) - b_3(2U) = \frac{b_1(2U)+b_2(2U)}{2} - \frac{b_1(U)+b_2(U)}{2}. \quad (13)$$

为了方便推导计算,令:

$$E_1(2U) = e_1(2U) - e_1(U); \quad (14)$$

$$E_2(2U) = e_2(2U) - e_2(U); \quad (15)$$

$$E_3(4U) = e_3(2U) - e_3(U). \quad (16)$$

由式(14)和(15)相加可得

$$E_1(2U) + E_2(2U) = 2[b_4(2U) - b_4(U)] - [b_1(2U) - b_1(U)] - [b_2(2U) - b_2(U)]. \quad (17)$$

由式(13)、(16)、(17)可得:

$$b_4(4U) - b_4(2U) = E_3(4U) + [b_3(4U) - b_3(2U)] = E_3(4U) + b_4(2U) - b_4(U) - \frac{E_1(2U) + E_2(2U)}{2}. \quad (18)$$

通过式(18)进行递推计算可得

$$b_4(4U) - b_4(2U_0) = [b_4(2U) - b_4(U_0)] + [e_3(4U) - e_3(2U_0)] - \frac{e_1(2U) - e_1(U_0)}{2} - \frac{e_2(2U) - e_2(U_0)}{2}. \quad (19)$$

假设在电压 U 足够小时, $e_1(U_0)=0$; $e_2(U_0)=0$; $e_3(2U_0)=0$; $b_4(2U_0)=b_4(U_0)$ 。则由式(19)整理可得

$$b_4(2U) - b_4(U) = e_3(2U) - 0.5e_1(U) - 0.5e_2(U). \quad (20)$$

令4号分压器的分压比电压系数为 $\delta_4(U)$,可知 $b_4(U) \ll 1$,由式(8)可得

$$K_4(U) = \frac{1}{m[1+b_4(U)]} \approx \frac{1}{m} [1 - b_4(U)] = \frac{R+r}{r} [1 + \delta_4(U)]. \quad (21)$$

其中

$$\delta_4(U) = -b_4(U). \quad (22)$$

因此,由式(20)、(22)可得4号分压器电压系数的递推公式

$$\delta_4(2U) - \delta_4(U) = 0.5e_1(U) + 0.5e_2(U) - e_3(2U). \quad (23)$$

使用图3的接线方式,分别用1-3号标准分压器对4号分压器进行校准试验测量,可以计算得出 $e_1(U)$ 、 $e_2(U)$ 、 $e_3(2U)$,然后通过插值法可得出分压器在某电压段的分压比电压系数^[14-15]。

4 ± 800 kV 直流分压器校准试验

由直流分压器校准分析计算模型可知, ± 800 kV 直流分压器校准试验需要两台 ± 400 kV 直流分压器作为标准分压器,且要求这两台分压器的高压臂和低压臂可分离,可用来串联组成一台 ± 800 kV 标准

分压器^[16-17]。

搭建好测试环境后,首先分别在 $U=n \times 50$ kV ($n=1, 2, \dots, 7, 8$) 时测量 $e_1(U)$ 、 $e_2(U)$ 、 $e_3(2U)$;再通过式(23)计算得到电压系数的变化量;然后用插值法得到

± 800 kV 直流分压器在 $n \times 100$ kV ($n=1, 2, \dots, 7, 8$) 电压下的电压系数。试验以 50 kV 为基准点,通过以上步骤测量计算 50~800 kV 的电压系数,试验结果数据见表 1^[18]。

表 1 校准试验结果数据

Table 1 Calibration test results data

测量电压 U/kV	相对误差数据			电压系数变化量 $\delta_4(2U) - \delta_4(U) \times 10^{-6}$	插值计算结果	
	$e_1(U) \times 10^{-6}$	$e_2(U) \times 10^{-6}$	$e_3(2U) \times 10^{-6}$		$2U/\text{kV}$	电压系数 $\times 10^{-6}$
50	-16.9	-18.4	-32.9	15.25	100	-15.34
100	-15.8	-17.6	-32.0	15.30	200	-16.33
150	-14.5	-16.2	-30.7	15.35	300	-17.56
200	-13.7	-15.3	-29.9	15.40	400	-18.90
250	-13.1	-14.4	-29.2	15.45	500	-20.01
300	-12.5	-13.6	-28.5	15.45	600	-21.27
350	-11.8	-13.0	-27.9	15.50	700	-22.62
400	-11.3	-12.2	-27.3	15.55	800	-23.90

试验中电压系数变化量与电压系数随测量电压的变化趋势见图 4, 电压系数为电压为 $2U$ 时的量值, 以上试验数据可以看出, 随着测试电压 U 升高, 电压系数在 $U-2U$ 电压段的变化量呈增加趋势, 说明电压越高对分压比电压系数的影响就越明显, 该现象与分压比影响因素有直接的关系, 因为电阻元件特性、泄漏电流、电晕电流等因素与施加电压大小基本呈正相关性。其中, 电压系数绝对值最大为 2.39×10^{-5} , 通过校准分析计算模型得出的校准数据达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级, 使直流分压器电压系数的测量精度达到较高水平^[19-20]。

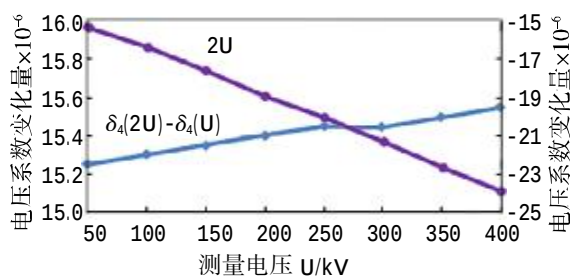


图 4 测量结果的变化趋势

Fig. 4 The trend of measurement results

5 结语

在研究分压比不确定性的基础上通过构建一种基于试验测量的直流分压器校准分析计算模型, 对 ± 800 kV 直流分压器分压比电压系数进行全面的评估计算, 试验证明该模型的校准水平高达 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级。采用该模型评定分压比的电压系数, 不仅减少了分压器校准测试工作量, 同时, 大大提升了直流分压器量值测量的准确度, 确保特高压直流输电系统的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电理论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
LIU Zhenya. UHVDC theory[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. HVDC technology status and prospects[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [3] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133-137.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137.
- [4] 李登云, 李前, 李鹤, 等. 1 000 kV 直流电阻标准分压器的电场仿真计算和分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2875-2880.
LI Dengyun, LI Qian, LI He, et al. Electric field calculation and analysis of 1 000 kV DC voltage standard divider[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2875-2880.
- [5] 王文昌, 张济麟. 直流分压器与直流分压器结构原理及现场应用分析[J]. 计算机技术与自动化, 2012, 31(2): 45-49.
WANG Wenchang, ZHANG Jilin. The analysis and application on working principle and structure of DC shunt and voltage transformer[J]. Computing Technology and Automation, 2012, 31(2): 45-49.
- [6] 任瑞武, 黄岳奎, 田桂花. 换流站直流分压器运行情况分析及改进措施[J]. 湖南电力, 2016, 36(3): 61-64.

- REN Ruiwu, HUANG Yuekui, TIAN Guihua. Operation analysis and improvement measures for direct voltage dividers of HVDC converter station[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(3): 61-64.
- [7] 曹继丰, 王 钢, 张海凤. 高压直流线路保护配置及其优化研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 101-103.
- CAO Jifeng, WANG Gang, ZHANG Haifeng. Study on line protection configuration and optimization of HVDC line[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 101-103.
- [8] 魏 星. 云广 ± 800 kV 直流输电线路重启功能分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3059-3064.
- WEI Xing. Analysis on DC line recovery sequence of Yunnan-Guangdong UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3059-3064.
- [9] 费 烨, 王晓琪, 汪本进, 等. $\pm 1\ 000$ kV 特高压直流互感器的选型和研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2380-2387.
- FEI Ye, WANG Xiaoqi, WANG Benjin, et al. Development on $\pm 1\ 000$ kV UHVDC instrument transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2380-2387.
- [10] 任达勇, 杨泽明, 李爱民, 等. 高压直流输电线路故障特征影响因素分析[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 70-73.
- REN Dayong, YANG Zeming, LI Aimin, et al. Analysis of the influencing factors on electric characteristics of HVDC line faults[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 70-73.
- [11] 任稳柱, 袁 渊, 杨忠州, 等. 电子式互感器稳态误差校验技术的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 64-68.
- REN Wenzhu, YUAN Yuan, YANG Zhongzhou, et al. Steady-state error calibration technology for electronic instrument transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 64-68.
- [12] 胡 灿. 超/特高压直流互感器现场校验技术及装置[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- HU Can. Check technology and equipment of transformer on site in UHVDC[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [13] IEC/TS 60815—2008 Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions, edition 1.0[S]. Geneva: IEC, 2008.
- [14] 田邑安, 张万荣, 行 鹏, 等. ± 800 kV 特高压直流工程直流滤波器设计研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 73-77.
- TIAN Yi'an, ZHANG Wanrong, XING Peng, et al. Study on the DC filter design for ± 800 kV UHVDC transmission projects[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 73-77.
- [15] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓冬, 等. ± 800 kV 特高压直流输电控制保护系统分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3277-3283.
- YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Discussion of ± 800 kV UHVDC transmission control and protection system[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 38(12): 3277-3283.
- [16] 魏 杰, 高海峰, 黄瑞平, 等. ± 500 kV 换流站直流场主设备典型外绝缘故障分析及对策[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 276-282.
- WEI Jie, GAO Haifeng, HUANG Ruiping, et al. Analysis and countermeasure on typical external insulation failure of main equipments of ± 500 kV converter stations[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 276-282.
- [17] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- ZHANG Renyu, CHEN Changyu, WANG Changchang. High-voltage testing technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [18] 任稳柱, 冯建华, 葛 震, 等. 800 kV 标准冲击电压测量系统及其不确定度的评定[J]. 计量学报, 2008, 29(2): 153-158.
- REN Wenzhu, FENG Jianhua, GE Zhen, et al. 800 kV standard impulse voltage measuring system and the uncertainty of evaluation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(2): 153-158.
- [19] 吴湘黔, 马晓红, 贵广 II 回直流输电工程调试分压器的研制及应用[J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 47-50.
- WU Xiangqian, MA Xiaohong. Development and application of the divider for commissioning of Guizhou Guangdong II HVDC transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(3): 47-50.
- [20] 邵明鑫, 王晓琪, 汪本进, 等. 特高压直流分压器内部温度场结构优化设计[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 8-13.
- SHAO Mingxin, WANG Xiaoqi, WANG Benjin, et al. Optimized design for HVDC voltage divider internal temperature field[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 8-13.
- 王 奇(1980—), 男, 工程师, 从事高电压外绝缘及其测试技术研究。