

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.05.007

直流分压器高压臂电容器的研制

杨永刚, 任春阳, 雷梅梅, 杨硕亮, 赵莹, 杨晓静, 姬凯
(西安西电电力电容器有限责任公司, 西安 710082)

摘要: 直流分压器也称直流电压互感器, 是直流输电系统测量直流电压的主要设备。目前高电压等级直流分压器主要基于阻容分压原理。本文介绍了直流分压器工作原理、高压臂电容器运行环境及产品特点, 并研制了电容器样机, 得出在电容心子尺寸相同情况下, 采用三膜两纸介质结构比采用两膜一纸介质结构的平均场强更低, 以及采用一体式端盖—膨胀器结构, 可提高空间利用率的结论, 分别通过电容器单元和直流分压器整机试验验证了设计制造的合理性。

关键词: 直流分压器; 阻容分压; 结构设计; 电容温度系数; 试验验证

Development of High Voltage Arm Capacitor for DC Voltage Dividers

YANG Yonggang, REN Chunyang, LEI Meimei, YANG Shuoliang, ZHAO Ying,
YANG Xiaojing, JI Kai
(Xi'an XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: The DC voltage divider, also known as DC voltage transformer, is the main equipment for measuring the DC voltage in the DC transmission system. At present, the high-voltage DC voltage divider is mainly based on the principle of resistive-capacitive voltage division. In this paper, the operating principle of the DC voltage divider, the operating environment of the high voltage arm capacitor and product characteristics are introduced and the capacitor prototype is developed. It is concluded that under the same size of the capacitor core, the average field strength of the three-film two-paper dielectric structure is lower than that of the two-film one-paper dielectric structure, and the adoption of integrated end cover-expander can improve the space utilization rate. The rationality of design and manufacture is verified by the test of capacitor unit and DC voltage divider.

Keywords: DC voltage divider; resistor-capacitor voltage division; structural design; temperature coefficient of capacitance; test verification

0 引言

近年来, 特高压直流输电系统在我国得到快速发展^[1-3], 直流控制保护系统需要直流电压互感器提供真实可靠的一次电压信息^[4]。直流分压器运行的可靠性是实现高压直流电压可靠监测的重要保证, 直接关系到直流输电系统的安全稳定运行^[5-8]。文中所述电容器作为直流分压器的高压臂电容, 其性能直接影响直流分压器的电场分布、绝缘等电气性能。

国内某直流电压互感器生产厂家, 其阻容分压部件所用电容器均为瑞士进口, 并且是唯一供应商。采用进口电容器不仅成本较高, 且可能被国外

供应商“卡脖子”。为打破这一不利局面, 该厂家与我公司合作进行直流分压器高压臂电容器的研制。

本文针对直流分压器的特点及运行特性, 介绍了高压臂电容器的运行环境、产品特点, 设计和生产了电容器样机, 并分别通过电容器单元和直流分压器整机试验验证了其设计、制造的合理性。

1 直流分压器工作原理

直流分压器是直流输电工程中换流站直流电压测量的主要设备。目前高电压等级的直流分压器主要是基于阻容分压原理进行分压^[9-12], 阻容分压原理见图1。其高压臂一端与输电线路连接, 低压臂一端接地, 通过高压臂和低压臂串联将设备电压

收稿日期: 2024-07-16

进行分压。

直流分压器的阻容分压原理图见图1,图中 C_1 为高压臂电容(即本文所述电容器); R_1 为高压臂电阻; C_2 为低压臂电容; R_2 为低压臂电阻。 C_1 与高压臂电阻 R_1 并联放置在复合绝缘套管内形成阻容分压器的高压臂。电阻部分采用精密高值电阻,实现高压直流电压的准确测量。在雷电冲击作用下,由于寄生电容的影响,分压器电阻上分布的电压将不再均匀,靠近高压侧的电阻承受更高的冲击电压,并联电容器后能够有效减小寄生电容的影响,使冲击电压分布均匀^[12],避免电阻因过压而损坏。当设备电压较高时,可由多节电阻和电容器先并联、再串联后使用。

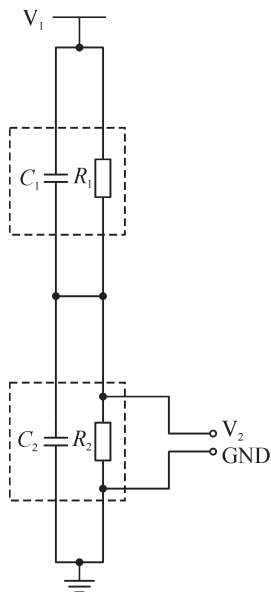


图1 直流分压器的阻容分压原理图
Fig. 1 Schematic diagram of resistor-capacitor voltage division for DC voltage divider

2 电容器运行环境及主要参数

直流分压器用电容器安装在直流分压器的绝缘套管内,绝缘套管内充不低于0.3 MPa压力的SF₆气体^[13]。受绝缘套管内部空间尺寸限制,电容器外形尺寸要求较小;电容器运行时处于存在一定压力的密闭空间内,在设备正常运行时,与电容器并联的电阻会持续发热,因此,工作温度最高可达90℃^[14-15]。该温度对电容器的正常运行是非常严苛的考验。电容器的主要技术参数见表1。

3 电容器结构设计

针对该类型电容器的使用特点及特殊要求,电容器从膨胀器结构尺寸、元件和心子设计等几个方面进行设计。

表1 电容器的主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of capacitor

参数	数值
额定直流电压/kV	150
额定电容/pF	2 000
电容偏差/%	±3
介质损耗角因数正切值/%	≤0.2
短时工频耐压/(kV,s)	300, 72
雷电冲击耐受电压/kV	650
操作冲击耐受电压/kV	600
在工频电压下局部放电量/pC	≤5
电容温度系数/K ⁻¹	≤2.5×10 ⁻⁴
外形尺寸/mm	Φ100×1 250

3.1 膨胀器结构及尺寸设计

针对本电容器运行温度高(最高可达90℃)、跨越范围宽(-40~90℃)的特点,设计时对内置膨胀器的结构进行了改进,既要保证低温时产品内部油介质不出现负压,也要保证高温时不超过其允许的运行压力。

本产品采用一体式端盖—膨胀器结构,见图2,即膨胀器直接焊接在端盖上,并在端盖上设置气门芯式充气嘴。可从端盖外侧调节内部压力,根据内部油温充入对应压力的气体。一体式结构减少了膨胀器的中间连接部件,提高了空间利用率,在有效的空间内获得尽可能大的补偿量。

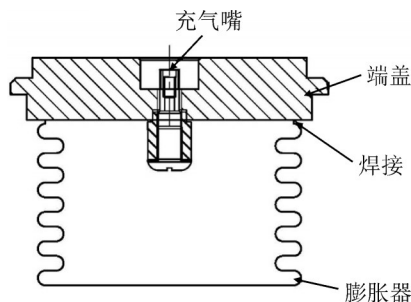


图2 一体式端盖—膨胀器结构
Fig. 2 Structure of integrated end cover-expander

电容器内部油体积的变化量 ΔV_y 为^[16]

$$\Delta V_y = V_y \gamma_y (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中: V_y 为绝缘油体积,cm³; γ_y 绝缘油体积变化率,取 7.0×10^{-4} ; t_1 、 t_2 分别为产品最低和最高运行温度,℃。

膨胀器的有效补偿量 ΔV_k 为

$$\Delta V_k = \frac{V_0 T_1}{T_0} \left(1 - \frac{P_1 T_2}{K P_2 T_1} \right) \quad (2)$$

膨胀器压力修正系数为

$$K = \frac{P_1}{P_2 (1 - K_1) + K_1 P_1} \quad (3)$$

式中: V_0 为常温下(20℃)膨胀器内部气体体积,

cm^3 ; T_0 、 T_1 、 T_2 分别为常温、最低温度和最高温度对应的开氏温度, K; P_1 为标准大气压强, MPa; P_2 为膨胀器设计压强(绝对压强), 0.3 MPa; K 为膨胀器压力修正系数; K_1 为膨胀器的弹性系数, 根据经验取 $K_1=0.9$ 。

当 $\Delta V_k > \Delta V_y$ 时, 膨胀器可满足补偿要求。

本产品内部绝缘油使用量为 1.8 kg, 折算体积为 $1\,818\text{ cm}^3$ 。当温度从 $-40\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ 变化时, 电容器内部油体积变化量 ΔV_y 为 165 cm^3 。

膨胀器结构为波纹式, 在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时内部气体体积为 578 cm^3 , 计算得到 ΔV_k 为 171 cm^3 , 满足设计要求。

基于选定的膨胀器, 当电容器内部温度为任意温度 T 时, 电容器内部油压 P 为

$$P=\frac{V_0P_1T}{K[V_0T_1+\gamma V_yT_0(T_1-T)]}\tag{4}$$

油压为 P 时扩张器的压力修正系数为

$$K=\frac{P_1}{P(1-K_1)+K_1P_1}\tag{5}$$

根据式(4)、式(5)可得, 电容器内部油压 P

$$P=\frac{K_1P_1T}{\left(1+\frac{\gamma_yV_yT_0}{V_0}\right)T_1-\left(1-K_1+\frac{\gamma_yV_yT_0}{V_0}\right)T}\tag{6}$$

根据式(6)计算得到不同温度下电容器内部油压, 结合标准大气压力计算的内外压差即表计压力, 见图 3。常规结构产品最高运行温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$, 电容器内外最大压差为 0.122 Mpa , 本产品内外最大压差为 0.191 Mpa , 较常规结构产品的最大压差提高了 50% 以上。采用新的密封结构可承受较高的内部油压, 提升最大压差后可降低膨胀器高度, 为电容器元件预留更多的空间, 使得元件工作场强降低成为可能。

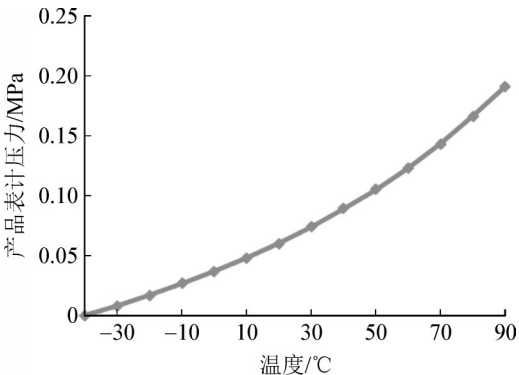


图3 不同温度下电容器表计压力(计算值)
Fig. 3 Gauge pressure of capacitor at different temperatures (calculated value)

3.2 电容器元件及心子设计

3.2.1 元件介质组合的选择

聚丙烯薄膜具有负的电容温度特性, 而电容器纸的电容温度特性呈正趋向, 根据电容器温度系数小于 $2.5\times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ 的要求^[17], 电容元件的介质需选择膜纸复合介质结构。根据计算, 采用两膜一纸或三膜两纸的介质结构, 电容温度系数均可控制在 $2.5\times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ 以内, 满足技术指标要求。因此需要对 2 种不同介质组合的元件平均工作场强进行分析比对, 以确定更优的选项。

以本项目电容器为例, 在外形尺寸固定及膨胀器尺寸确定后, 即可确定电容器心子的高度; 根据套管内径确定卷绕电容元件各项材料的规格尺寸, 初步计算出两膜一纸及三膜两纸介质的元件串联数、元件标称电容, 通过式(7)^[18]计算出元件圈数、厚度, 校核元件压紧系数、电容值, 调整参数进行迭代计算, 直至各项计算结果合理。最终计算结果及 2 种介质组合的对比见表 2。

$$w_y=\frac{\sqrt{D_x^2+\frac{1.44\times 10^7C_{yb}d_k(d_k+d_j)}{\varepsilon_f b_j}}-D_x}{4(d_k+d_j)}\tag{7}$$

式中: W_y 为元件圈数; D_x 为心轴直径, cm; C_{yb} 为元件标称电容, μF ; d_k 、 d_j 、 b_j 分别为极间介质厚度、极板厚度和极板宽度, cm; ε_f 为复合介电系数。

表2 不同介质的元件计算结果
Table 2 Calculation results of components with different media

项目	两膜一纸	三膜两纸
元件圈数/圈	46	45
元件厚度/mm	9.32	14.13
元件串联数/串	94	62
压紧系数	0.917	0.918
平均场强($K=1$)/(kV/mm)	39.9	37.2

通过对比可发现, 在心子高度一致的情况下, 采用三膜两纸介质搭配结构的元件平均场强较采用两膜一纸介质元件的平均场强低了 7.2% , 可以保证电容器更加安全可靠的运行。因此该电容器选用三膜两纸的介质结构。

3.2.2 心子结构设计

为进一步降低元件平均场强, 对内部心子进行小型化设计, 首次采用 U 型撑条、自锁紧销子; 采用该结构后简化了装配结构, 提高了套管内部空间利用率, 并且内部元件串联数增加了两串, 电容器元件场强降低了 3.2% 。

此外在研制中还通过选用性能优良的耐高温聚丙烯薄膜材料,增加元件衬垫以提高绝缘裕度等措施解决高温(运行时温升较高)问题,最终成功研制直流分压器用电容器,见图4。

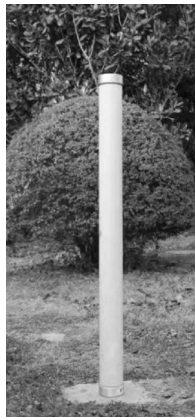


图4 直流分压器用电容器样品
Fig. 4 Capacitor sample for DC voltage dividers

4 电容器试验验证

针对本产品的特殊结构及使用要求,在产品研制过程中进行了大量验证试验来检验产品的性能。

4.1 静态密封验证

套管进厂后首先进行了静态密封测试实验。试验时将上、下盖及密封圈装配在空套管上,并在盖上装配一块压力表。然后充入0.4 MPa压力的氮气,保持24 h后,表压无变化。说明产品套管及端盖的密封性能符合要求。

4.2 电气性能验证

本产品技术参数要求的绝缘水平是根据产品正常运行时处于SF₆绝缘气体中提出的。根据电容器绝缘距离核算及以往试验经验判断,电气试验若在空气中进行不一定能通过^[19-21]。因此进行交、直流耐压及局放测试、局部放电测试及冲击耐受试验(出厂试验及型式试验)时将产品装入瓷套中,抽真空后充入0.3 MPa的SF₆绝缘气体后进行。样机在厂内进行验证试验时,测试的局部放电水平超过要求值。经排查,由于样机与试验用套管存在高度差,样机顶部用一根高压线与套管上盖进行电气连接,局部放电测试时高压线存在放电情况,引起测试结果偏大。后续产品试验时将电容器悬挂在试验用套管的上盖处,局部放电测试结果全部满足要求。产品所有电气试验最终顺利通过。

4.3 产品内部油压及电容温度系数测试

产品进行电容温度系数测量时将5节电容器

竖直放入高低温箱内,在-30~90℃温度范围内每10℃为一个点进行测量,每个点保持12 h后用全自动介质损耗测试仪进行电容值测量。测量的同时,在其中三节电容器的上盖上装配压力表,测量电容器随温度变化时其内部油压的变化。测试时,对三节电容器设置不同内部压力。样品在高低温箱内进行试验见图5。



图5 样品在高低温箱内进行试验
Fig. 5 Test of sample at hot and cold temperature chamber

不同温度下电容量变化曲线见图6,经计算得出,5台产品电容温度系数达到预期值,绝对值最大的为 $1.589 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,均满足电容器温度系数小于 $2.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 的技术指标要求。

不同温度下的内部油压曲线见图7,初始压力较高的电容器内部压力在90℃时为0.296 MPa,初始压力略高的电容器内部压力在90℃时为0.22 MPa,产品内部油压已超过膨胀器的设计压力,低于膨胀器最大运行压力0.4 MPa的限值,长时间运行膨胀器可能出现变形甚至渗漏油导致补偿功能失效;初始压力较低的电容器内部压力在-30℃时已降至0,若温度继续降低,电容器内部将会出现负压。因此产品必须严格按照设计好的温度—压力对照表进行充压。

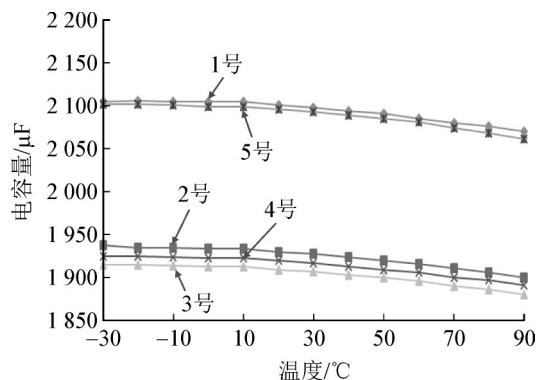


图6 不同温度下电容量变化曲线
Fig. 6 Variation curve of capacitance at different temperatures

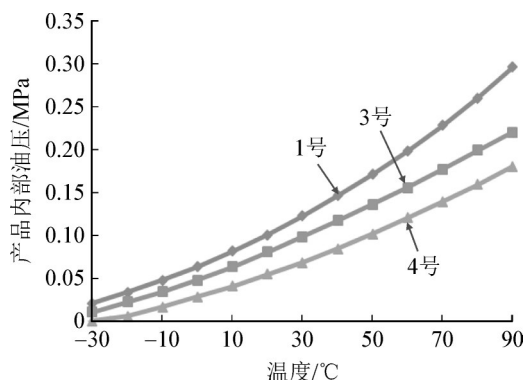


图7 不同温度下电容器内部油压曲线

Fig. 7 Internal oil pressure curve of capacitor at different temperatures

4.4 型式试验

本项目电容器型式试验按照技术条件及 GB/T 19749.1—2016《耦合电容器及电容分压器第1部分:总则》在第三方实验室进行^[22],所有试验项目均一次性通过,型式试验照片见图8。之后为国内某直流分压器厂家提供了4节 OFF150-0.002 型电容器,与其他国内厂家生产的4节电阻器组装成 ± 800 kV 直流分压器,按照 GB/T 20840.7—2007《互感器第7部分:电子式电压互感器》也成功通过了型式试验验证^[23]。

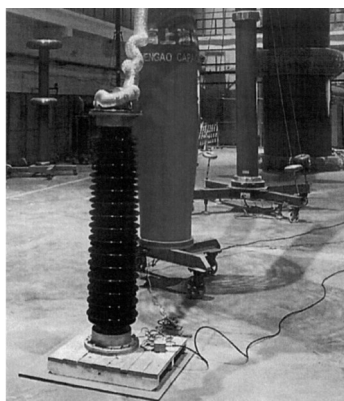


图8 产品型式试验照片

Fig. 8 Picture of product in type test

5 结语

本文研制了直流分压器高压臂电容器样机,产品研制过程中得出如下结论:

1) 电容元件选用膜纸复合介质,可满足电容温度系数的要求。在电容心子尺寸相同情况下,采用三膜两纸介质结构比采用两膜一纸介质结构的平均场强更低。

2) 采用一体式端盖—膨胀器结构,提高空间利用率;新的密封结构使膨胀器最大运行压力提高,高度降低,进一步节约空间。

另外需要注意的是,对于超宽运行温度范围的电容器,需严格控制内部油压,以防止电容器在较低温度时出现负压,在较高温度时膨胀器长时间张紧而失去弹性。

目前国内此类电容器的应用较多,如 GIS 断路器用均压电容器^[24]、发电机断路器用防护电容器^[25]、交流分压器用电容器等^[26],但是基本都在采用进口电容器。本文介绍的直流分压器高压臂电容器,其结构也可在这些特殊类型的电容器上应用,为实现它们的国产化提供了可借鉴的思路。

参考文献

- [1] 何贤彪. 特高压直流输电技术现状以及我国的应用前景[J]. 通讯世界, 2018(2): 216-217.
HE Xianbiao. Current situation of UHVDC transmission technology and its application prospect in China[J]. Telecom World, 2018(2): 216-217.
- [2] 谢永涛, 李希哲, 傅康, 等. ± 800 kV 特高压直流输电工程技术[J]. 西北水电, 2019, 175(2): 78-82.
XIE Yongtao, LI Xizhe, FU Kang, et al. ± 800 kV UHVDC transmission engineering technology[J]. Northwest Hydropower, 2019, 175(2): 78-82.
- [3] 李鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输电装备最新技术发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.
- [4] 刘顺新, 潘良胜, 文振华. 直流输电换流站中的电流互感器配置研究[J]. 自动化仪表, 2014, 35(10): 26-29.
LIU Shunxin, PAN Liangsheng, WEN Zhenhua. Research on the configuration of current transformers in HVDC converter station[J]. Process Automation Instrumentation, 2014, 35(10): 26-29.
- [5] 樊阳文, 翁凌云, 罗苏南, 等. ± 1100 kV 直流电子式电压互感器绝缘特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 41-49.
FAN Yangwen, WENG Lingyun, LUO Sunan, et al. Research on the insulation characteristics of ± 1100 kV UHVDC electronic voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 41-49.
- [6] 李俊霞, 严兵, 张爱玲, 等. 特高压直流双极区直流保护系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 130-136.
LI Junxia, YAN Bing, ZHANG Ailing, et al. Reliability research for UHVDC bipolar area DC protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 130-136.
- [7] 张平, 杨朋威, 汤汉松, 等. 直流电压测量装置暂态阶跃响应性能现场测试技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021,

- 49(9):143-149.
- ZHANG Ping, YANG Pengwei, TANG Hansong, et al. Fieldtest technology of the transient step response features of a DC voltage measuring device[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 143-149.
- [8] 朱梦梦. 直流电子式电压互感器测试方法研究与应用[J]. 云南电力技术, 2018, 46(2): 69-72.
- ZHU Mengmeng, Research and application on testing method of DC electronic voltage transformer[J]. Yunnan Electric Power, 2018, 46(2): 69-72.
- [9] 费烨, 王晓琪, 汪本进, 等. $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流互感器的选型与研制[J]. 高电压技术. 2010, 36(10): 2380-2387.
- FEI Ye, WANG Xiaoqi, WANG Benjin, et al. Selection and development of $\pm 1\,000\text{ kV}$ UHVDC transformer[J]. High Voltage Engineering. 2010, 36(10): 2380-2387.
- [10] 宋宏天, 肖霞, 徐雁, 等. 配电网故障指示器中电压测量的研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 110-115.
- SONG Hongtian, XIAO Xia, XU Yan, et al. Research on voltage measurement in the distribution network fault indicator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 110-115.
- [11] 汪本进, 王睿晗, 吴士普, 等. 特高压直流电压互感器换热结构设计及其对误差特性的影响研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 84-92.
- WANG Benjin, WANG Ruihan, WU Shipu, et al. Research on the heat exchange structure designing for UHVD CVT and its influence on error characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 84-92.
- [12] HUY P N, 韩民晓. 直流阻容式电压互感器用于直流输电谐波电压测量的研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(3): 54-60.
- HUY P N, HAN Minxiao. Study on application of DC resistive - capacitive voltage transformer in harmonic voltage measurement for HVDC[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(3): 54-60.
- [13] Specification of technical grade sulphur hexafluoride (SF_6) and complementary gases to be used in its mixtures for use in electrical equipment: IEC 60376—2018[S]. 2018.
- [14] 翟少磊, 罗奕, 段怡, 等. 直流分压器暂态温升及冷却特性研究[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 140-149.
- ZHAI Shaolei, LUO Yi, DUAN Yi, et al. Study on transient temperature - rise and cooling characteristic of DC voltage divider[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 140-149.
- [15] 汪本进, 吴细秀, 徐思恩, 等. 复奉特高压直流分压器二次电压异常原因分析[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 7-14.
- WANG Benjin, WU Xixiu, XU Si'en, et al. Investigate on the failure mechanism of the DC voltage divider for its secondary voltage jumping abnormally in fulong and fengxian substation[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 7-14.
- [16] 房金兰. 耦合电容器的油补偿设计[J]. 电力电容器, 1979(1): 1-8.
- [17] 戴冬雪, 王维, 金攀, 等. 标准电容器的温度系数试验[J]. 电测与仪表, 2015, 52(16): 94-96.
- DAI Dongxue, WANG Wei, JIN Pan, et al. Test on temperature coefficient of standard capacitors[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(16): 94-96.
- [18] 电机工程手册, 第4卷第6篇电力电容器[M].
- [19] 高压输变电设备的绝缘配合: GB 311.1—2012[S]. 2012.
- Insulation co - ordination—Part 1: Definitions, principles and rules: GB 311.1—2012[S]. 2012.
- [20] 陈昌渔, 王昌长, 高胜友. 高电压试验技术[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [21] 张宗喜, 舒乃秋, 曾宏, 等. 高压直流滤波电容器直流局部放电的试验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 43-47.
- ZHANG Zongxi, SHU Naiqiu, ZENG Hong, et al. Experimental study on DC partial discharge of HVDC filter capacitors[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 43-47.
- [22] 耦合电容器及电容分压器第1部分: 总则: GB/T 19749.1—2016[S]. 2016.
- Coupling capacitors and capacitor dividers—Part 1: General rules: GB/T 19749. 1—2016[S]. 2016.
- [23] 互感器第7部分: 电子式电压互感器: GB/T 20840.7—2007[S]. 2007.
- Instrument transformers Part 7: Electronic voltage transformers: GB/T 20840. 7—2007[S]. 2007.
- [24] 王会涛. 断路器均压电容器测试方法[J]. 云南电力技术, 2010, 39(5): 67-70.
- WANG Huitao. Test method for circuit breaker voltage equalization capacitor[J]. Yunnan Electric Power, 2010, 39(5): 67-70.
- [25] 马占峰, 成勇, 贾华, 等. 发电机断路器用防护电容器的选型及应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015(10): 57-61.
- MA Zhanfeng, CHENG Yong, JIA Hua, et al. Investigation on the model selection and application of the voltage protection capacitors for generator circuit breakers[J]. Power Capacitor & Power Compensation, 2015(10): 57-61.
- [26] 罗苏南, 南振乐. 基于电容分压的电子式电压互感器的研究[J]. 高电压技术. 2004, 30(10): 7-9.
- LUO Sunan, NAN Zhenle. Research on electronic voltage transformers based on capacitive voltage divider[J]. High Voltage Engineering. 2004, 30(10): 7-9.
- 作者简介:
- 杨永刚(1988—), 男, 工程师, 主要从事电容式电压互感器及套管式电容器产品的设计开发工作。
- 任春阳(1968—), 男, 正高级工程师, 主要从事电容式电压互感器及套管式电容器的技术研究工作。

- General requirements for monitoring equipment of power quality: GB/T 19862—2016 [S].2016.
- [15] 电能质量测试分析仪检定规程: DL/T 1028—2006 [S].2006.
- Verification code for power quality analyzer DL/T 1028—2006 [S].2006.
- [16] 郭敏,陈卫东,金庆忍.一种电能质量监测装置在线对比检测方法: ZL2018105900391 [P].2018-07-03.
- [17] 郭敏,陈卫东,金庆忍.一种用于标准电能质量监测装置的校准方法: ZL201810588211X [P].2018-07-06.
- [18] 陈卫东,郭敏,金庆忍,等.一种用于电能质量监测装置在线检定的校时系统及方法: ZL2018105894121 [P].2018-07-15.
- [19] 郭敏,陈卫东,金庆忍.一种电能质量监测装置的在线比对检测装置: ZL2018215075786 [P].2018-07-30.
- [20] 姚知洋,郭敏,陈卫东.一种电能质量在线比对标准测量装置: ZL201820887205X [P].2018-08-12.
- [21] 郭敏,肖静,黄金剑.一种电能质量监测终端的现场在线比对检测装置: ZL2020224615244 [P].2020-08-30.
- [22] 电磁兼容 试验和测量技术 电能质量测量方法: GB/T 17626.30—2012 [S].2012.
- Electromagnetic compatibility - Testing and measurement techniques—Power quality measurement methods: GB/T 17626.30—2012 [S].2012.
- [23] 电能质量 术语: GB/T 32507—2016 [S].2016.
- Power quality—Terms: GB/T 32507—2016 [S].2016.
- [24] 电力自动化通信网络和系统 第7-3部分:基本通信结构 公用数据类: DL/T 860.7-3—2013 [S].2013.
- Communication networks and systems for power utility automation—Part 7-3: Basic communication structure—Common data classes: DL/T 860.7-3—2013 [S].2013.
- [25] 电力自动化通信网络和系统 第7-4部分:基本通信结构 兼容逻辑节点类和数据类: DL/T 860.7—2014 [S].2014.
- Communication networks and systems for power utility automation —Part 7-4: Basic communication structure—Compatible logical node classes and data object classes: DL/T 860.7—2014 [S].2014.
- [26] 电力系统的时间同步系统 第1部分:技术规范: DL/T 1100.1—2018 [S].2018.
- Time synchronism systems of power system—Part 1: Technical specifications: DL/T 1100.1—2018 [S].2018.
- [27] 电力系统的时间同步系统 第4部分:测试技术规范: DL/T 1100.4—2018 [S].2018.
- Time synchronism systems of power system—Part 4: Measuring and testing instrument technical specifications: DL/T 1100.4—2018 [S].2018.
- [28] 仪用电流互感器: JB/T 5472—2022 [S].2022.
- Instrument current transformers: JB/T 5472—2022 [S].2022.
- [29] 电能质量标准源校准规范: DL/T 1368—2014 [S].2014.
- Calibration specifications for power quality calibrator: DL/T 1368—2014 [S].2014.
- [30] 数值修约规则与极限数值的表示和判定: GB/T 8170—2008 [S].2008.
- Rules of rounding off for numerical values & expression and judgement of limiting values: GB/T 8170—2008 [S].2008.
- [31] 电能质量监测终端检测技术规范: DL/T 1862—2018 [S].2018.
- Inspection technical specification for power quality monitoring terminal: DL/T 1862—2018 [S].2018.
- 作者简介:**
- 郭敏(1984—),男,高级工程师,通信作者,主要研究方向为电力电子、电能质量和无功电压分析与控制技术。E-mail: guo_m_sy@gx.csg.cn。
- 高寒(1998—),男,工程师,主要研究方向为电能质量。E-mail: gaohanatw@163.com。
- 华回春(1980—),男,副教授,主要研究方向为电能质量、电力市场。E-mail: huahuichun@126.com。
- 周聪(1987—),男,工程师,主要研究方向为电能质量监测、检测、分析、评估及治理。E-mail: 315668574@qq.com。

(上接第47页)

雷梅梅(1988—),女,工程师,主要从事电力电容器产品的设计开发工作。

杨硕亮(1985—),男,工程师,主要从事电容式电压互感器产品的设计开发工作。

赵莹(1976—),女,工程师,主要从事电容式电压互感器

产品的设计开发工作。

杨晓静(1986—),女,工程师,主要从事电容式电压互感器产品的设计开发工作。

姬凯(1987—),男,工程师,主要从事电力电容器、电容式电压互感器产品的工艺工作。