

π 型接线高压电容器组不平衡电流离线测试方法

雷战斐¹, 史磊², 耿池勇³, 吴鹏¹

(1. 国网宁夏电力有限公司超高压公司, 银川 750011; 2. 国网宁夏电力有限公司, 银川 750011;
3. 深圳市恒东电气有限公司, 广东 深圳 518116)

摘要:国内交、直流滤波器电容器组一般采用 H 桥型结构,但某些换流站采用 π 型结构电容器组, H 桥型电容器组不平衡电流离线测试方法不再适用。本文提出将 π 型结构电容器组构成 H 桥型间接测量不平衡电流的新方法,分别对电阻、电容和电感 3 种构成 H 桥的方法进行计算公式推导和仿真分析。为减小现场电磁干扰对测量精度的影响,本文采用多频率点测试不平衡电流的方法进行现场测试,结果表明新方法理论思路正确,可以准确测量不平衡电流。

关键词: π 型电容器组; 电阻桥臂; 不平衡电流

Off-line Test Method for Unbalanced Current of High Voltage Capacitor Bank as π Type Structure

LEI Zhanfei¹, SHI Lei², GENG Chiyong³, WU Peng¹

(1. Maintenance Company of State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750011, China;
2. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China;
3. Shenzhen Hengdong Electric Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518116, China)

Abstract: AC and DC filter capacitor banks in China generally use H-bridge structure, but some converter stations use π -type structure capacitor banks, and the off-line test method for unbalanced current of H-bridge capacitor banks is not applicable any longer. In this paper, a new method of indirectly measuring unbalanced current is proposed by forming a π -type capacitor bank into an H bridge. And the method derives the calculation formula and simulates such three methods of forming the H bridge as resistance, capacitance and inductance. For reducing the influence of on-site electromagnetic interference on the measurement accuracy, the method of testing unbalanced current at multiple frequency points is used for on-site testing. The results show that the theoretical idea of the new method is correct and can accurately measure unbalanced current.

Keywords: capacitor bank as π type structure; resistor bridge arm; unbalanced current

0 引言

直流输电工程中,为了保持系统无功平衡并消除谐波,换流站需加装交、直流滤波器。滤波器电容器组采用桥式或 π 型结构,国内大多数滤波器和无功补偿装置都是电容和电感串、并联组合成的 H 桥^[1]。即电容器组的 4 个桥臂构成 H 型,不平衡电流互感器跨接于两个电容桥臂的中间,不平衡电流互感器二次侧输出即为不平衡电流。

国内有些换流站采用 π 型结构电容器组,即由

两个桥臂并联组成,不平衡电流测试点不再是 H 桥上下两个桥臂的中间节点。因此, π 型结构电容器组的不平衡电流离线测试方法,理论计算公式和测试方法均不同于 H 桥型电容器组^[2-7]。

本文针对 π 型结构电容器组的特殊结构,提出新的不平衡电流离线测试方法,也就是在低压加压测试的情况下,实现不平衡电流的准确测量。如果在低压测试时出现不平衡电流超过告警值的情况,需调节桥臂电容以减小不平衡电流,以保障电容器组投入高压运行后仍具有较小的不平衡电流。

收稿日期:2023-05-05

基金项目:2021年度宁夏回族自治区自然科学基金项目(2021AAC03495)。

1 π 型结构电容器组不平衡电流接线方式

以国内某换流站为例,直流滤波场采用 π 型结构电容器组。电容器组接线图如图1所示。图中 C_1 、 C_2 两个桥臂分别串接电流互感器 CT_1 、 CT_2 ,在 CT_1 、 CT_2 二次侧串接 CT_0 。运行状态下, CT_1 测量 C_1 桥臂电流, CT_2 测量 C_2 桥臂电流,将 CT_1 、 CT_2 的二次侧反接,如图2所示,则二次侧回路电流即为不平衡电流, CT_0 输出不平衡电流至保护设备。当电容器组存在单只或多只不合格的电容器时,造成流经 CT_0 的不平衡电流超过保护设定值,严重时会引起电容器组跳闸^[8-10]。

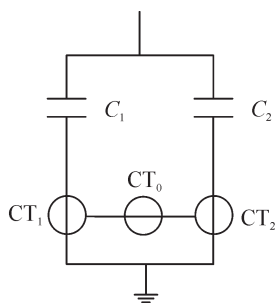


图1 电容器组原理图

Fig. 1 Schematic diagram of capacitor bank

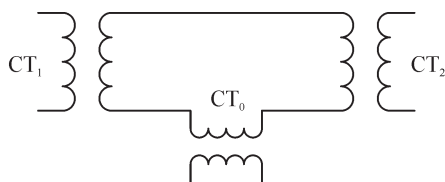


图2 不平衡电流接线图

Fig. 2 Wiring diagram of unbalanced current

2 不平衡电流现场测试方法

2.1 直接测量法

在高压电容器组上施加交流电压,在图2不平衡回路 CT_0 位置串接微安表测量不平衡电流,试验接线见图3。

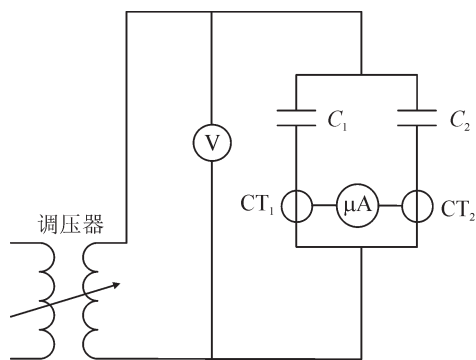


图3 不平衡电流测试接线图

Fig. 3 Wiring diagram for unbalanced current testing

电容器组不平衡电流测试等效电路如图4所示,假定电容器组两端所加测试电压为 U ,总电流为 I ,不平衡电流为 I_0 。

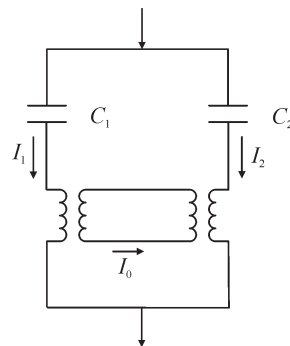


图4 电容器组等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of capacitor bank

可以得出不平衡电流公式为

$$I_0 = U \times \omega \times (C_1 - C_2) \quad (1)$$

上述不平衡电流直接测量存在两个问题,一是微安表接在 CT_1 、 CT_2 二次侧, CT_1 和 CT_2 的变比具有不一致性,变比偏差会对不平衡电流测量结果带来较大误差;二是 CT_1 、 CT_2 二次侧电流比一次侧小很多,因此需要施加几千伏或更高的测试电压,给测试人员带来触电危险,而且加压设备体积庞大,给测试工作带来不便。

2.2 间接测量法

间接测量法就是将 π 型结构电容器组加上两个桥臂构成H桥型,从上下两个桥臂的中间节点测量不平衡电流^[11-25]。构成H桥的方法可以是电阻、电容或电感,以下分别对这3种接法进行分析。

1) 增加电阻桥臂的测试方法

增加电阻桥臂的等效电路图见图5。如图5所示,假定电容器组两端所加测试电压为 U ,总电流为 I ,流过各桥臂电流为 I_1 、 I_2 ,不平衡电流为 I_0 。

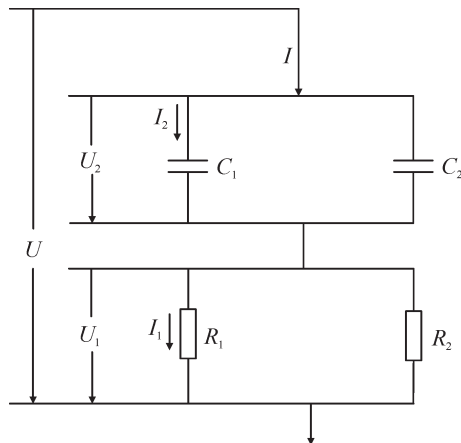


图5 增加电阻桥臂的等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram with resistor bridge arm added

由图 5 可列以下方程:

$$U_1 = U \frac{\omega R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2 + \omega R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \quad (2)$$

$$U_2 = U \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + \omega R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = U \frac{\omega R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2 + \omega R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = U \frac{\omega C_1 (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + \omega R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \quad (5)$$

由式(4)和(5)得出不平衡电流公式为

$$I_0 = I_2 - I_1 = U \frac{\omega (C_1 R_1 - C_2 R_2)}{R_1 + R_2 + \omega R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \quad (6)$$

2)增加电容桥臂的测试方法

如果增加两个电容 C_3 和 C_4 构成 H 桥型结构,根据上述电阻桥臂的推导过程,可以得出不平衡电流公式为

$$I_0 = U \frac{\omega (C_2 C_3 - C_1 C_4)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \quad (7)$$

3)增加电感桥臂的测试方法

如果增加两个电感 L_1 和 L_2 构成 H 桥型结构,根据上述电阻桥臂的推导过程,同样可以得出不平衡电流公式为

$$I_0 = U \frac{\omega (L_1 C_1 - L_2 C_2)}{L_1 + L_2 - \omega^2 L_1 L_2 (C_1 + C_2)} \quad (8)$$

3 间接测量法 3 种实现方法比较

3.1 电阻型 H 桥取值分析

由(6)式可以看到,在外加测试电压频率固定的情况下,电阻 R_1 、 R_2 与 I_0 呈非线性关系,也就是说电阻 R_1 、 R_2 的取值应在一个合理的范围内。

为更加直观的分析 R_1 、 R_2 的取值对不平衡电流的影响,采用 Multisim 软件建立仿真模型,见图 6。

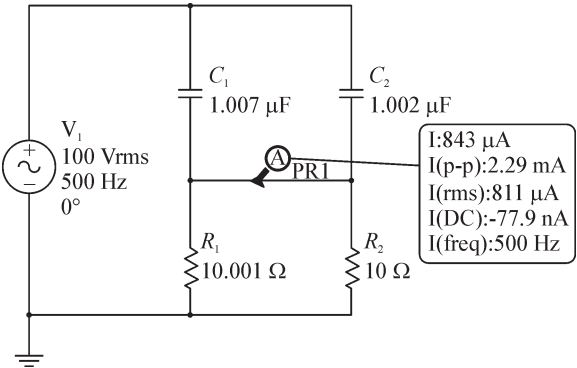


图 6 不平衡电流测试仿真模型
Fig. 6 Simulation model of unbalanced current testing

换流站高压电容器组主要用于滤波和提供无功补偿,单只电容器容值 30~70 μF,每个桥臂由 20~40 只电容器串联而成,桥臂电容容值一般在

0.8~2.5 μF。图 6 中, C_1 取 1.007 μF, C_2 取 1.002 μF,电阻 R_1 和 R_2 偏差为 0.01%。A 为电流表,用于测量不平衡电流。仿真使用的信号源电压 100 V/500 Hz,桥臂电阻 R_1 和 R_2 在 1 Ω~1 kΩ 之间变化,记录不平衡电流测量值,测试结果见表 1。

表 1 桥臂电阻变化值对应的不平衡电流测量值的仿真数据表

Table 1 Simulation data table of measurement of unbalanced current corresponding to the variation value of the bridge arm resistance

R_1/Ω	R_2/Ω	不平衡电流/ μA
1.000 1	1.0	812
5.000 5	5.0	811
10.001	10.0	811
20.002	20.0	810
50.005	50.0	801
100.01	100.0	773
200.02	200.0	684
500.05	500.0	430
1000.1	1 000.0	242

根据表 1 中数据,以桥臂电阻为横坐标,不平衡电流为纵坐标,作不平衡电流随桥臂电阻变化曲线图,见图 7。

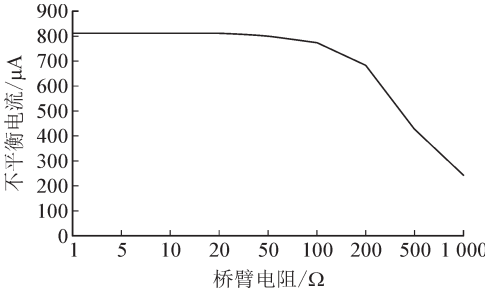


图 7 不平衡电流随桥臂电阻变化曲线
Fig. 7 Variation curve of unbalanced current with bridge arm resistance

由图 7 可以看出,桥臂电阻在 20 Ω 以下时,对不平衡电流测量没有影响。随着桥臂电阻的增大,到 100 Ω 时,不平衡电流测量误差达到 4.8%。桥臂电阻在 200 Ω 以上时,不平衡电流测量值快速下降,不再具有实用价值。

在电阻 R_1 、 R_2 的取值范围确定后,下一步需要确定电阻的精度。由(6)式可知,不平衡电流的大小取决于 $(C_1 R_1 - C_2 R_2)$,当桥臂电阻完全一致时,设定:

$$C_1 = 1.007 \mu F, C_2 = 1.002 \mu F$$

$$R_1 = 1.0 \Omega, R_2 = 1.0 \Omega$$

$$C_1 R_1 - C_2 R_2 = 0.005$$

假设桥臂电阻精度误差为 0.1%,即:

$$R_1 = 1.001 \Omega, R_2 = 1.0 \Omega$$

$C_1R_1 - C_2R_2 = 0.006$

假设桥臂电阻精度误差为 0.01%,即:

$R_1=1.000\ 1\ \Omega$, $R_2=1.0\ \Omega$

$C_1R_1 - C_2R_2 = 0.005\ 1$

由以上分析可知,桥臂电阻 R_1 、 R_2 偏差为 0.1% 时,带来不平衡电流测量偏差为 20%;桥臂电阻 R_1 、 R_2 偏差为 0.01% 时,带来不平衡电流测量偏差为 2%。因此,采用电阻构成 H 桥时,电阻精度要达到万分之一,才不会对不平衡电流测试有影响。

3.2 电容和电感型 H 桥取值分析

对于增加两个电容构成 H 桥型结构的方法,由(7)式可知, I_0 与 ω (即测试电压频率)呈线性关系,可以施加多种频率的电压测试不平衡电流。因此,选取电容时只要与 C_1 或 C_2 的值接近即可。但相对于电阻的精度来说,电容的精度要低很多,远远到不了 0.01%。因此这种测试方法难以应用到实际测试中。

同样,对于增加两个电感构成 H 桥型结构的方法,由(8)式可知, I_0 与 ω 呈非线性关系,不能采用多种频率测试。而且,电感精度也远不能达到 0.01%,这种测试方法也难以实现不平衡电流的准确测量。

4 现场测试

为验证本文提出的不平衡电流离线测试方法的有效性,在国内某换流站进行现场实测。测试时,附近间隔电容器组正常运行,因此待测电容器组不平衡电流会受到强电磁场干扰的影响。为减少电磁干扰的影响,可以施加异频电压测试不平衡电流。

测试方案主要由可调频电压源和不平衡电流测量两部分组成,如图 8 所示。

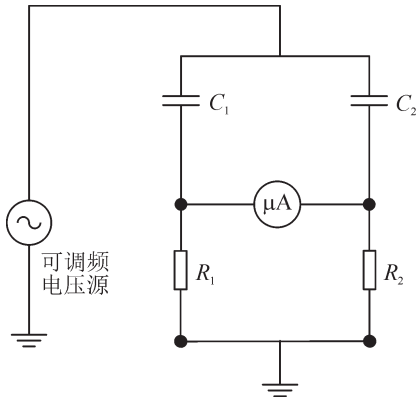


图8 不平衡电流现场测试接线图
Fig. 8 Wiring diagram for field test of unbalanced current

图 8 中可调频电压源将多种频率的电压施加于电容塔两端,然后由高精度微安表读取不平衡电流值。

该换流站有极 1、极 2 两个直流滤波场,每个直流滤波场电容器组由 C_1 、 C_2 两个桥臂组成,每个桥臂 26 层,每层 2 个电容器,每个桥臂由 52 个电容器组成。电容器型号为 CHDB-182,额定电压为 6 618.0 V,无功功率为 823.20 kvar,额定电容量为 53.36 μF ,瑞典 ABB 公司 2000 年生产。

实测每个桥臂的电容值如下:

$C_1=0.864\ 4\ \mu\text{F}$, $C_2=0.865\ 1\ \mu\text{F}$

为方便观察测试效果,分别采用增加电阻桥臂和电感桥臂两种方法测试不平衡电流并记录分析。

1)增加电阻桥臂的测试方法

选取误差 0.01% 的电阻两只,测试电阻值为

$R_1=1.031\ 0\ \Omega$, $R_2=1.031\ 1\ \Omega$

如图 8 所示,用可调频电压源在电容器塔两端施加 100 V 交流电压,用高精度微安表测量不平衡电流值,再由式(6)计算不平衡电流值理论值。

表 2 是用电阻法测试不平衡电流的测试结果,表中 I_c 是不平衡电流测量值, I_l 是由式(6)计算的不平衡电流理论值。

表2 电阻法测试不平衡电流结果
Table 2 Result of unbalanced current tested by resistance method

f/Hz	$I_c/\mu\text{A}$	$I_l/\mu\text{A}$	偏差/%
100	11.36	12.00	5.3
200	22.80	24.08	5.3
300	33.66	36.12	6.8
400	47.14	48.16	2.1
500	61.54	60.20	2.2

2)增加电感桥臂的测试方法

直接利用电流互感器 CT_1 、 CT_2 的一次线圈作为两个电感,实测电感值如下:

$L_1=0.821\ \text{mH}$, $L_2=0.824\ \text{mH}$

用可调频电压源在电容器塔两端施加 100 V 交流电压,在 CT_1 、 CT_2 的上端测量不平衡电流值,再由式(8)计算不平衡电流值理论值。

表 3 是用电感法测试不平衡电流的测试结果,表中 I_c 是不平衡电流测量值, I_l 是由式(8)计算的不平衡电流理论值。

表3 电感法测试不平衡电流结果
Table 3 Result of unbalanced current tested by inductance method

f/Hz	$I_c/\mu\text{A}$	$I_l/\mu\text{A}$	偏差/%
100	14.5	11.00	31.8
200	24.8	22.08	12.3
300	33.9	33.22	2.1
400	55.1	43.16	27.6
500	81.9	52.20	56.9

表2增加电阻桥臂的测试方法,对电容器塔施加不同频率电压时,不平衡电流呈线性变化,而且不平衡电流测量值与理论值接近,说明这种现场测试方法是可行的。表3采用增加电感桥臂的测试方法,可以看出测试结果与理论值偏差太大,原因有两个方面,一是 CT_1 、 CT_2 的一次线圈电感偏差大,二是不平衡电流与测试电压频率呈非线性关系。

5 结语

1)本文介绍了 π 型结构电容器组不平衡电流接线方式,给出了不平衡电流直接测量法的试验方法和计算公式,并分析了这种测试方法存在的问题。

2)本文提出将 π 型结构电容器组构成H桥型间接测量不平衡电流的新方法,分别对电阻、电容和电感3种构成H桥的方法进行计算公式推导和仿真分析。

3)为减少电磁干扰的影响,本文采用施加多种频率电压测试不平衡电流的方法,这种测试方法可以减小现场电磁干扰对测量精度的影响,同时多点测量也可以验证测试结果的有效性。

4)将本文提出的离线测试新方法在国内某换流站进行现场实测,将增加电阻桥臂和电感桥臂两种方法进行对比测试,现场试验结果与仿真结果一致。

参考文献

- [1] 栗磊,梁亚波,张浪. H桥不平衡电流高频测试法在 ± 660 kV换流站中的应用[J]. 宁夏电力,2013(3):22-24.
- [2] 吴鹏,摆亲,刘志远. 换流站高压电容器不平衡电流离线测试方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(10):132-135.
WU Peng, BAI Qin, LIU Zhiyuan, et al. A method of unbalanced current off-line test for high-voltage capacitors in converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10):132-135.
- [3] 张晓英,侯秉臣,王琨,等. 基于改进天牛须算法的含固态变压器的配电网无功优化[J]. 高压电器,2022,58(11):221-229.
ZHANG Xiaoying, HOU Bingchen, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with solid state transformer based on improved beetle antennae search algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11):221-229.
- [4] 王浩哲,丁爱飞,陆继翔,等. 计及新能源接入的地区电网人工智能无功优化[J]. 电网与清洁能源,2023,39(1):133-142.
WANG Haozhe, DING Aifei, LU Jixiang, et al. Artificial intelligence reactive power optimization of regional power grids considering renewable energy access[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1):133-142.
- [5] 梁天明,李豹,张蕾,等. 换流站交流滤波器电容器故障分析及探讨[C]//首届直流输电与电力电子专委会学术年会,2012.
- [6] 李梓玮,许丽娟. 基于概率神经网络的直流滤波器电容器开路故障定位方法[J]. 电测与仪表,2023,60(1):48-56.
LI Ziwei, XU Lijuan. Open-circuit fault location method of DC filter capacitor based on probabilistic neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1):48-56.
- [7] 傅美平,毛建容,宋锐,等. 大型新能源富集地区储能电站电压无功控制策略[J]. 电器与能效管理技术,2022(2):88-94.
FU Meiping, MAO Jianrong, SONG Rui, et al. Voltage and reactive power control strategy of energy storage power stations in large new energy enriched areas[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(2):88-94.
- [8] 乔春雨,易建波,谷宇杰,等. 基于虚拟同步机技术的光储协控无功优化策略[J]. 电网与清洁能源,2022,38(6):129-136.
QIAO Chunyu, YI Jianbo, GU Yujie, et al. Reactive power optimization strategy of photovoltaic and energy storage co-control based on virtual synchronous generator[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6):129-136.
- [9] 刘雨佳,何柏娜,吴硕,等. 双辅支路抑制HVDC换流站直流侧故障方案[J]. 东北电力技术,2022,43(12):26-30.
LIU Yujia, HE Baina, WU Shuo, et al. Scheme for suppressing HVDC converter station dc side faults with dual auxiliary branches[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(12):26-30.
- [10] 刘志峰,廖建平,陈宇飞,等. 一起 ± 800 kV换流站变压器油位异常的故障分析[J]. 变压器,2023,60(2):64-68.
LIU Zhifeng, LIAO Jianping, CHEN Yufei, et al. Fault analysis of abnormal oil level in a ± 800 kV converter station transformer[J]. Transformer, 2023, 60(2):64-68.
- [11] 段涛,张智勇,李德建,等. ± 500 kV换流站交流滤波器组不平衡电流调整新策略[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(6):135-139.
DUAN Tao, ZHANG Zhiyong, LI Dejian, et al. The new unbalanced current adjusting strategy of AC filter in ± 500 kV converter station[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6):135-139.
- [12] 黄银龙,罗光辉,董超群,等. 电容器组不平衡电流调平方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(5):29-34.
HUANG Yinlong, LUO Guanghui, DONG Chaoqun, et al. Unbalanced current adjustment method for capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5):29-34.
- [13] 黄进红,李伦,武红旗,等. HVDC用电容器装置现场臂间调平方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38

- (2):6-9.
- HUANG Jinhong, LI Lun, WU Hongqi, et al. Study on adjustment method between the field arms of capacitor for HVDC transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(2):6-9.
- [14]李彬彬,张拓,刘博,等. 110 kV 电容器组地震模拟振动台试验及有限元分析[J]. 高压电器, 2022, 58(8):150-159.
- LI Binbin, ZHANG Tuo, LIU Bo, et al. Shaking table test for seismic simulation and finite element analysis on 110 kV capacitor bank[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):150-159.
- [15]张智光,倪秋龙,廖培,等. 计及新能源消纳的地区电网无功电压优化控制策略[J]. 浙江电力, 2023, 42(1):46-53.
- ZHANG Zhiguang, NI Qiulong, LIAO Pei, et al. An optimal reactive voltage control strategy for regional power grids considering new energy consumption[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1):46-53.
- [16]徐志伟,吴星仪,蔡晖. 适应线路电缆化的220 kV变电站无功补偿计算研究[J]. 东北电力技术, 2022, 43(5):6-9.
- XU Zhiwei, WU Xingyi, CAI Hui. Research on reactive power compensation calculation of 220 kV substation adapting to cabled transmission line[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(5):6-9.
- [17]黎劲松,陈建东,杨宝起,等. 面向配网电压暂降治理的单相无功电流检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9):140-145.
- LI Jinsong, CHEN Jiandong, YANG Baoqi, et al. Research on single-phase reactive current detection algorithm for voltagesag management in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9):140-145.
- [18]李文竹,寇汉鹏. 考虑暂态过电压抑制的新能源送出型电网无功优化方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(6):117-125.
- LI Wenzhu, KOU Hanpeng. Reactive power optimization method of new energy outgoing grid considering transient overvoltage suppression[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6):117-125.
- [19]陈涛,李必伟,韩源,等. 考虑零序不平衡电流的小电流接地系统故障选线研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(4):124-130.
- CHEN Tao, LI Biwei, HAN Yuan, et al. Fault line selection of low-current grounding system considering zero-sequence unbalanced current[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4):124-130.
- [20]王帅,任军辉,娄彦涛,等. ± 525 kV/2 GW 海上风电柔性直流送出系统海上换流站设备选型探讨[J]. 高压电器, 2022, 58(7):11-17.
- WANG Shuai, REN Junhui, LOU Yantao, et al. Discussion on equipment selection of offshore converter station of ± 525 kV/2 GW offshore wind power flexible DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7):11-17.
- [21]李唐兵,童涛,席儒,等. 直流偏磁下的电力变压器振动特性研究[J]. 变压器, 2023, 60(3):52-58.
- LI Tangbing, TONG Tao, XI Ru, et al. Research on vibration characteristics of transformer under DC bias[J]. Transformer, 2023, 60(3):52-58.
- [22]王磊,万磊,殷幼军,等. ± 500 kV 混合直流受端 VSC 换流站的雷电侵入波过电压研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(1):82-89.
- WANG Lei, WAN Lei, YIN Youjun, et al. Overvoltage of lightning intruding waves of ± 500 kV VSC converter station in hybrid HVDC system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1):82-89.
- [23]雷鸣东,张世洪,许可,等. 环境温度对桥差保护电容器组不平衡电流的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2):1-4.
- LEI Mingdong, ZHANG Shihong, XU Ke, et al. Study on the influence of ambient temperature on the unbalanced current of bridge differential protection capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2):1-4.
- [24]杨勇,张静,杨智,等. 特高压直流输电系统交流滤波器电容元件击穿故障仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(4):1-6.
- YANG Yong, ZHANG Jing, YANG Zhi, et al. Study on breakdown fault simulation for capacitor element of AC filter of UHVDC transmission system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(4):1-6.
- [25]黄大卓,严柏平,沈春城,等. 基于二次谐波分量衰减特性的变压器励磁涌流识别方法[J]. 变压器, 2023, 60(1):28-34.
- HUANG Dazhuo, YAN Baiping, SHEN Chuncheng, et al. Novel inrush current distinguishing scheme based on second harmonic component decaying characteristics of transformer current. Transformer, 2023, 60(1):28-34.

作者简介:

雷战斐(1991—),男,工程师,主要从事特高压换流站运检工作。E-mail:143932974@qq.com。

史磊(1987—),男,工程师,主要从事特高压换流站运检工作。

吴鹏(1980—),男,高级工程师,主要从事变电运检工作。