

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.01.010

750 kV 超高压大容量 TRV 电容器研制

莫华明, 王增文, 刘雁兵, 莫锟, 黄有祥

(桂林电力电容器有限责任公司, 广西 桂林 541004)

摘要: TRV 电容器在系统标称电压高于 100 kV、额定频率为 50 Hz 或 60 Hz 的电力系统中, 接在母线相与地之间或者与限流电抗器并联串接于母线中, 用于限制断路器上的瞬态恢复电压(TRV)和恢复电压上升率(RRRV)。文章提出了 TRV 电容器研制的关键技术问题和解决思路, 并介绍了研制的国内外首台套 750 kV 超高压大容量 TRV 电容器的设计结构、性能指标、产品特点、电场计算、抗震验算和型式验证。可为国内 TRV 电容器的研制提供理论基础和宝贵的设计经验。

关键词: TRV 电容器; 产品研制; 电场计算; 抗震验算; 型式试验

Development of 750 kV UHV and High Power TRV Capacitor

MO Huaming, WANG Zengwen, LIU Yanbing, MO Kun, HUANG Youxiang

(Guilin Power Capacitor Co., Ltd., Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: In the power system with nominal voltage above 100 kV and rated frequency at 50 Hz or 60 Hz, TRV capacitor is connected between the busbar phase and ground or is in parallel with the current limiting reactor and connected into the busbar in series for limiting the transient recovery voltage (TRV) and the rate of rise of recovery voltage(RRRV) of the circuit breaker. In this paper, the key technical problem and solution of the TRV capacitor are proposed and the first set of 750 kV UHV and high power TRV, which is developed both at home and abroad, is introduced in the aspect of design structure, performance data, product characteristic, electric field calculation, seismic calculation and type tests. It can provide theoretical basis and valuable design experience for the development of TRV capacitor in China.

Keywords: TRV capacitor; product development; electric field calculation; seismic calculation; type test

0 引言

随着电网规模和用电负荷的不断增大, 系统短路电流超出现有断路器的开断能力, 严重威胁到电网的安全运行^[1-2]。限制短路电流是一个系统问题, 可采用优化网络结构、多母线分裂运行或者母线分段运行、互联系统直流联网、高阻抗变压器、升级断路器的遮断能力、串联限流电抗器等措施^[3-4]。由于串联限流电抗器对于限制短路电流是一种比较经济且行之有效的方式, 所以在多个实例工程中得以成功应用^[5-8]。由于限流电抗器是电感性设备, 其在限制断路器瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)幅值的同时, 也会抬升瞬态恢复电压的上升率(rate of rise of TRV, RRRV), 而 TRV 幅值和 RRRV 是影响断路器开断性能的两个关键指标, 为了确保

断路器能正常开断短路故障, 需要采取抑制 RRRV 的措施^[9-10]。GB 1984—2014《高压交流断路器》^[11]第 8.103.7 条“应用限流电抗器时的选择”强烈建议采用电容器和电抗器并联或者接地的措施调节断路器开断出线故障(电抗器在断路器的电源侧)和电抗器后面的故障(电抗器在断路器的负载侧)时面临的高频率 TRV。

本文以 ± 800 kV 灵州换流站 750 kV 银川东间隔扩建工程的国内外首台套 750 kV 超高压大容量 TRV 电容器的研制为例, 提出研制的关键技术问题和解决思路, 并介绍了产品的设计结构、性能指标、产品特点、电场计算、抗震验算和型式验证。

1 TRV 电容器工作原理及用途

1.1 工作原理

TRV 电容器的工作原理及对断路器断口

RRRV 的抑制可以通过图 1 进行分析。

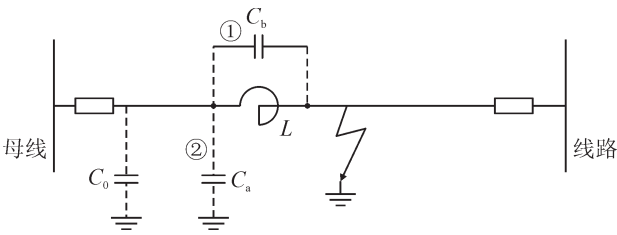


图1 TRV 电容器工作原理图
Fig. 1 Operating principle diagram of TRV capacitor

图 1 中, C_0 为断路器线路侧对地的杂散电容, 包括互感器、开关、避雷器等设备的杂散电容及线路相间和对地电容。当限流电抗器侧及其附近发生故障后, 由于限流电抗器的存在, 流过短路电流时限抗两端存在较大压差, 当电流过零熄灭时, 限流电抗母线侧的残压较高, 由于杂散电容 C_0 较小为 pF 级, 电容与限流电抗构成的二阶振荡回路的自振频率 $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC_0}$ 较高达到几十 kHz, 造成断路器跳闸瞬间 RRRV 超过标准限值, 可能影响断路器的正常开断。为了限制断路器的 RRRV, 可以在限抗两端并联 TRV 电容器(见图 1 中①), 或者在限抗端对地间并联 TRV 电容器(见图 1 中②), 或者同时采用串并结合的方式(见图 1 中的①+②)。本研制产品采用电容与限抗并联接线(见图 1 中①)。当系统中接于一定电容量的 TRV 电容器后, 二阶振荡回路的电容量增大至 C_0+C_a 或者 C_0+C_b 或 $C_0+C_a+C_b$, 振荡回路的振荡频率降低, 使断路器跳闸瞬间 RRRV 满足标准限值要求。TRV 电容器的额定电容量需要结合具体工程的分布参数通过仿真计算确定, 一般为几十 nF 到几百 nF 级。

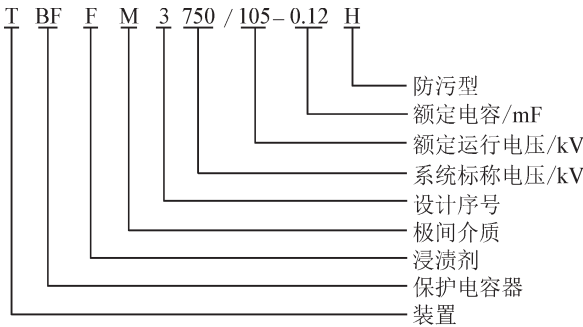
1.2 用途

TRV 电容器在系统标称电压高于 100 kV、额定频率为 50 Hz 或 60 Hz 的电力系统中, 接在母线相与地之间或者与限流电抗器并联串接于母线中, 用于限制断路器上的瞬态恢复电压(TRV)和恢复电压上升率(RRRV)。

2 主要技术参数和设计结构

2.1 产品命名

研制产品的型号为 TBFFM₃750/105-0.12H(以下简称电容器装置), 该产品型号参照 JB/T 7114.1—2013《电力电容器型号编制办法 第 1 部分: 电容器单元、集合式电容器及箱式电容器》^[12]进行编制, 产品型号各字母及数字表示的意义如下:



2.2 主要技术参数

电容器装置主要技术参数见表 1, 其余性能指标满足 IEC 62146—2《Capacitors for high-voltage alternating current circuit-breakers—Part 2: TRV capacitors》^[13]要求。

表1 电容器主要技术参数 Table 1 Main technical parameters of capacitor		
参数		数值
系统额定电压/kV		750
电容器组额定运行电压/kV		105
电容器组额定电容/nF		120
电容器组绝缘水平 (两端间)	额定雷电冲击耐受电压(峰值)/kV	1 550
	放电试验电压(峰值)/kV	1 675
	额定操作冲击耐受电压(峰值)/kV	1 300
	额定短时工频耐受电压 (1 min 有效值)/kV	550
支柱绝缘子绝缘水平 (相对地)	额定雷电冲击耐受电压(峰值)/kV	2 374
	额定操作冲击耐受电压(峰值)/kV	1 699
	额定短时工频耐受电压 (1 min 有效值)/kV	1 085
	无线电干扰电压(RIV)/μV	≤500
距电容器中心点 10 m 近地面高 1.5 m 处的		
电场强度/(kV/m)		≤10
抗震水平加速度/g		0.317
局部放电水平/pC		≤10
海拔高度/m		2 000
环境温度/℃		-40/+55

2.3 设计结构

电容器装置总体结构为 5 并 3 串, 总高 13 m, 总重 16 t。电容器组由 5 柱并联构成, 每柱由 3 节串联叠装, 满足额定电容要求。每柱电容器由 800 kV 支柱绝缘子支撑满足端对地的绝缘水平要求。均压环在电容器组的高压端, 中间法兰连接位置及低压端位置设置均压环, 外绝缘电场分布均匀。电容器和绝缘子叠柱呈圆周+中心布置, 套管、绝缘子和结构布置整体配合满足高抗震要求。电容器装置结构见图 2。

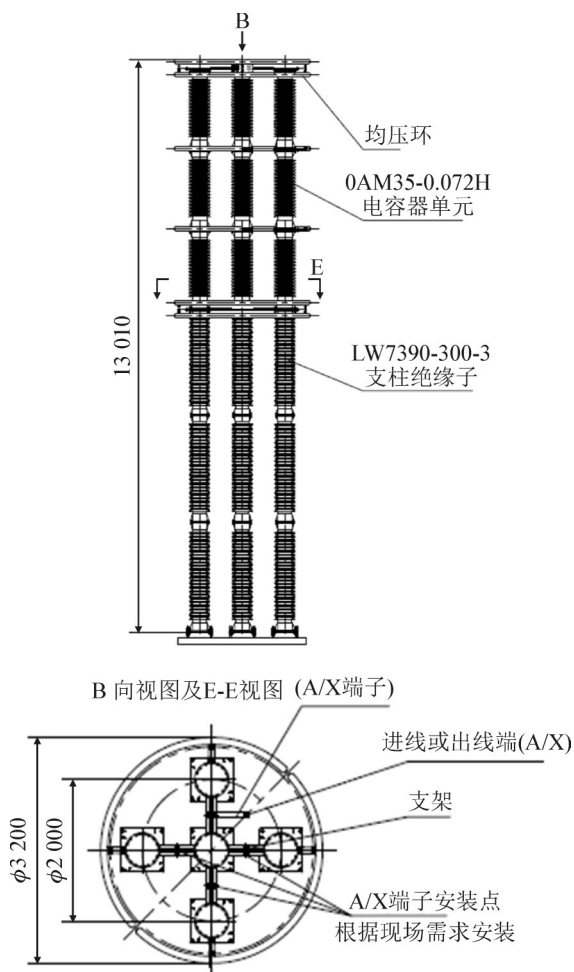


图2 电容器装置结构图
Fig. 2 Structural diagram of capacitor

3 主要研制内容

3.1 绝缘性能

3.1.1 内绝缘

电容器装置电压高(750 kV),容量大(120 nF),绝缘耐受水平高,内绝缘设计首先要保证运行的高安全可靠,其次要尽量减轻重量和高度满足抗震性能,同时要兼顾经济性和生产制造的可行性。研制的关键技术是局部放电性能和绝缘结构设计。

绝缘设计采用新颖独特的元件和心子结构,提高耐压和局部放电起始电压。电导体防晕处理,场强设计结合先进的制造技术合理优化。为提高电容器的局部放电性能,元件卷制区域采用多级控制系统,洁净度提高到 ISO 7 级,温、湿度由自控系统控制,确保心子制造在超净及恒温恒湿的净化间内进行;真空浸渍采用双抽单注生产工艺,确保真空度和浸渍效果。

3.1.2 外绝缘

电容器装置的外绝缘按照对端和端对地分级设计,外绝缘配置根据国标 GB 311.1^[14]和规范要求设计并尽量控制高度。电容器组及支柱绝缘子的爬电距离和干弧距离满足绝缘耐受海拔修正要求,伞形符合 GB/T 26218.1 和 GB/T 26218.2^[15-16]的规定。

3.1.3 型式试验验证

电容器装置根据国标 GB/T 19749.1^[17]及规范的要求进行了第三方型式试验检测,各项性能指标满足标准及规范的要求。

3.2 电场计算

电容器组串联于母线,从输入端到输出端通体 6 m 长度范围都是高电位,整个表面电场分布要满足防电晕和噪声要求。电容器装置是一个非常复杂的三维结构,无法简化为二维计算,需要建立三维模型,利用大型有限元分析软件 ANSYS 从整体和局部分别计算电容器装置的整体和各部件的表面电场情况^[18-19]。

3.2.1 电晕起始场强

电晕起始场强 E_c 根据比克(F.W.Peek)提出的不同电极结构的 E_c 计算^[20-22]为

$$E_c = 30.3m\delta \left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{r\delta}} \right) \text{ kV/cm} \quad (1)$$

式中: m 为表面粗糙系数,对于全面电晕 $m=0.82$,对于局部电晕 $m=0.72$,光滑表面 $m=1$; δ 为空气的相对密度,0 海拔处近似取为 1; r 为柱形电极半径,cm。海拔与空气密度的对应关系见表 2。

表2 海拔与空气密度关系
Table 2 Relationship between altitude and air density

海拔高度/m	0	1 000	2 000	2 500	3 000	4 000	5 000
相对大气压力	1.000	0.881	0.774	0.724	0.666	0.591	0.514
相对空气密度 δ	1.000	0.903	0.813	0.770	0.730	0.653	0.583

3.2.2 有限元模型和边值问题

由于电气设备的尺寸相比于交流电压、操作冲击电压和雷电冲击电压的波长都小得多,所以电器设备在任一瞬间的电场都可以近似地认为是稳定的,可以按静电场来分析^[23-28]。

电容器装置串联在 800 kV 的电路中,电容器组两端对地的电压均为 $U_b=800$ kV(即电容器组近似于 1 个等位体),由电容器组逐级推断支柱绝缘子各点的对地电位,并结合底面的零电位,整体构成电场计算的边界条件。电容器装置的整体模型及边界条件见图 3。

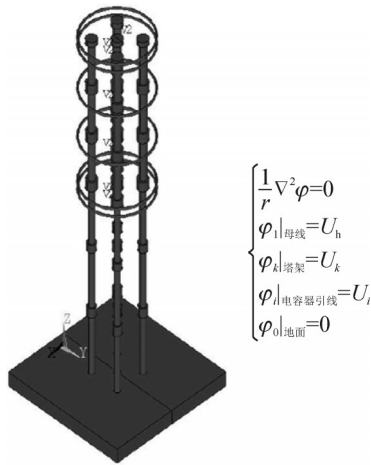


图3 电容器装置模型及边界条件
Fig. 3 Model and boundary condition of capacitor

3.2.3 计算结果

通过对法兰和均压环结构优化,层间电容器电容配平,控制表面电场分布均匀。采用有限元数值计算方法对其电场分布进行验算,电场仿真结果见图4,近地1.5 m仿真计算结果见图5,具体数值见表3。主要结论如下:

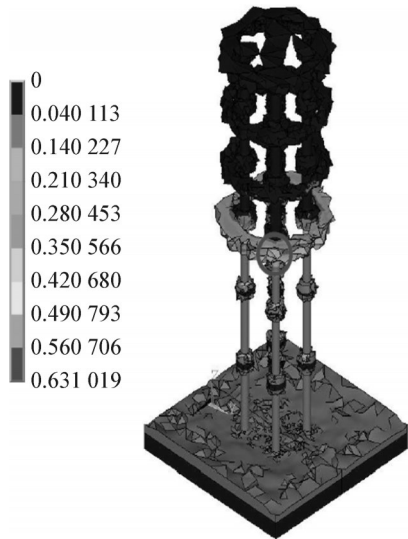


图4 电容器装置电场仿真结果
Fig. 4 Electric filed simulation result of capacitor

- 1)电容器装置的最大场强为6.31 kV/cm,位于下层均压环表面附近,小于海拔2 000 m的均压环柱形电极的电晕起始场强19.8 kV/cm,其他部位的电场强度远小于各自的电晕起始场强值,不会产生电晕;
- 2)近地1.5 m高的电场强度分布范围:距地1.5 m处电场强度由中间向四周逐渐降低,最高电场强度位于中央电容器柱附近,约为45 kV/cm。距中心点距离越远,数据下降明显,在7 m位置电场强度约为15 kV/cm,在8.3 m位置电场强度约为10 kV/cm,在10 m位置电场强度约为5 kV/cm。

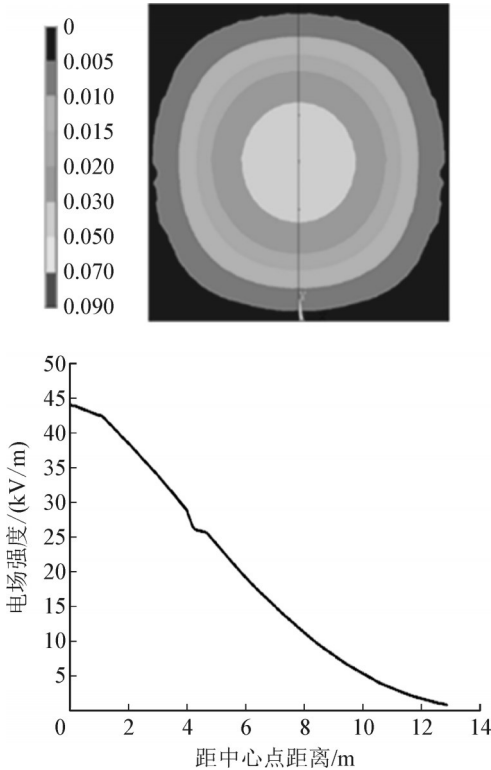


图5 近地1.5 m仿真计算结果
Fig. 5 Simulation and calculation result at 1.5 m away from the ground

表3 电场计算结果
Table 3 Electric field calculation result

结构 名称	电场强度最 大值 $E_c/(kV/cm)$	电晕起始电场强度 (kV/cm)			电极 结构
		0 m	2 000 m	5 000 m	
电容器组	6.31	24.3	19.8	14.7	—
均压环	6.31	24.3	19.8	14.7	柱形导体
层间绝缘子	2.65	4.0	4.0	4.0	—
金具	3.90	25.5	20.7	15.6	柱形导体

3.3 抗震性能

电容器高而重,抗震水平要求高。产品研制时,套管借鉴特高压1 000 kV电容式电压互感器的设计经验,支柱绝缘子借鉴特高压电容器塔的设计经验,电容器采用N+1圆周布置的结构实用新型专利技术,横向的每层电容器单元和支柱绝缘子单元层间采用高度配平,优化连接方式,保证机械受力均匀。

根据《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013)^[29],该电容器装置抗震计算采用振型分解反应谱法,采用《特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震安装与维护技术规程》(Q/GDW 11132—2013)^[30]的反应谱,如图6所示。抗震计算时,包括体系的重力(端子板、金具、导线的重量)、内部压力、端子拉力及0.25倍设计风载等产生的荷载,地震波最大水平加速度0.317 g,垂直水平加速度为0.254 g,支架放大系数取1.2。

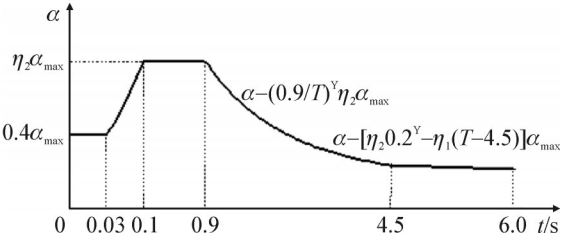


图6 地震反应谱曲线
Fig. 6 Seismic response spectrum curve

3.3.1 结构自震周期

经有限元计算分析,结构的第1、第2、第3自振周期分别为 $T_1=1.285\text{ s}$, $T_2=1.285\text{ s}$, $T_3=0.397\text{ s}$, 对应的频率分别为 0.778 Hz , 0.778 Hz , 2.519 Hz , 振型图见图7。

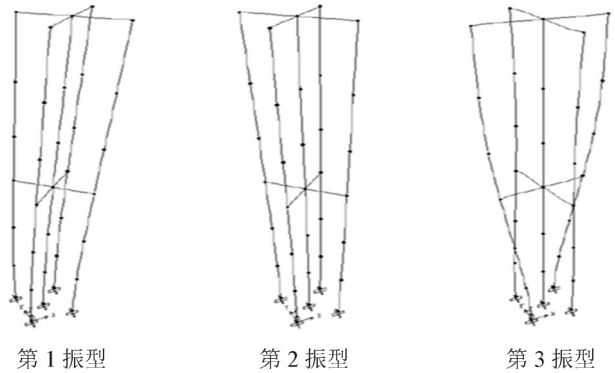


图7 振型图
Fig. 7 Mode diagram

表4 短期组合载荷下的动态计算结果
Table 4 Dynamic calculation result under short term combined load

项目	下节绝缘子底部截面	中节绝缘子底部截面	上节绝缘子底部截面	下节电容器单元底部截面	中节电容器单元底部截面	上节电容器单元底部截面
折合应力/MPa	84.478	56.186	30.957	36.892	17.508	14.155
强度极限/MPa	165	165	165	118	118	118
安全系数	10.953	2.937	5.33	3.199	6.740	8.366

4 设备投运情况

电容器 2019 年在 $\pm 800\text{ kV}$ 灵州换流站顺利安装并投运成功,投运 5 年多以来,没有发生任何因电容器质量导致的运行故障问题,满足工程使用要求。现场运行情况见图 8。



图8 $\pm 800\text{ kV}$ 灵州换流站 750 kV TRV 电容器现场运行照片
Fig. 8 Site operation picture of 750 kV TRV capacitor at $\pm 800\text{ kV}$ Lingzhou converter station

3.3.2 组合载荷下的计算结果

抗震验算采用有限元模型,计算出电容器装置最不利截面(绝缘子底部)短期组合最大应力为 84.478 MPa ,其安全系数为 1.953,最小安全系数满足不小于 1.67 的规范要求;绝缘子底部截面持续组合最大应力为 16.204 MPa ,其安全系数为 10.183,最小安全系数满足不小于 2.5 的规范要求,抗震性能满足水平加速度 0.317 g 的抗震设防要求。电容器装置各部件在短期组合(地震)载荷下的应力计算结果见表 4。

3.4 强电磁环境的发热控制

限流电抗器的额定电流高达几千安,大电流在周围产生的强电磁场会导致周围一定距离范围内的闭合金属回路发热。加装限抗属旧站改造,场地有限,电容器和电抗器间的距离受到限制,为了避免电容器运行发热故障,产品设计时金属件选用非磁性材质,在结构设计上保证机械强度的同时避免形成闭环回路,尽量控制电容器与限流电抗器之间的最小净距离大于 1.2 倍电抗器半径。电容器现场安装投运 5 年多以来,没有发生任何异常发热现象。

5 结语

- 1) 电容器装置根据国标 GB/T 19749.1—2016 和规范要求进行了第三方型式试验验证,产品各项性能指标满足技术要求。
- 2) 采用有限元分析软件 ANSYS 对电容器装置进行电场仿真计算,电容器装置最大场强为 6.31 kV/cm ,位于下层均压环表面附近,小于海拔 $2\,000\text{ m}$ 的均压环柱形电极的电晕起始场强为 19.8 kV/cm ,不会产生电晕。
- 3) 电容器装置根据《特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震安装与维护技术规程》(Q/GDW 11132—2013)进行仿真抗震验算,支柱绝缘子最不利截面的短期组合最大应力为 84.478 MPa ,其安全系数为 1.953,抗震设防水平抗震性能满足水平加速度 0.317 g 的抗震设防要求。

4)国内外首台套 750 kV 超高压大容量 TRV 电容器研制成功,并在±800 kV 灵州换流站成功投运,满足工程使用要求。

5)国际标准 IEC 62146—2《Capacitors for high-voltage alternating current circuit-breakers—Part 2:TRV capacitors》2023 年颁布实施,建议国标制定结合工程建设经验和国情采标修订。

参考文献

- [1] 周坚,胡宏,庄侃沁,等.华东 500 kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨[J].华东电力,2006, 34(7):55-59.
ZHOU Jian, HU Hong, ZHUANG Kanqin, et al. Short-circuit current of 500 kV east China power grid and its limitation[J]. East China Electric Power, 2006, 34(7): 55-59.
- [2] 向铁元,王智伟,秦跃进,等.湖北电网 2007 年短路电流水平及限制措施[J].电力科学与技术学报,2007, 22(1): 87-91.
XIANG Tiejuan, WANG Zhiwei, QIN Yuejin, et al. Short-circuit current level and it's limited measures for Hubei power grid in 2007[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2007, 22(1): 87-91.
- [3] 叶幼君,鲍爱霞,程云志.浙江 500 kV 电网短路电流的控制[J].华东电力,2006, 34(3):11-15.
YE Youjun, BAO Aixia, CHENG Yunzhi. Control of short-circuit current for Zhejiang 500 kV power grids[J]. East China Electric Power, 2006, 34(3): 11-15.
- [4] 袁娟,刘文颖,董明齐,等.西北电网短路电流的限制措施[J].电网技术,2007, 31(10):42-45.
YUAN Juan, LIU Wenying, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in north-west China power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45.
- [5] 蔡晖,祁万春,汪惟源,等.串联电抗器限流技术在江苏电网的应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2018, 39(1):102-106.
CAI Hui, QI Wanchun, WANG Weiyan, et al. Study on current-limit technology of series reactor in Jiangsu power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 102-106.
- [6] 祝瑞金,蒋跃强,杨增辉,等.串联电抗器限流技术的应用研究[J].华东电力,2005, 33(5):18-22.
ZHU Ruijin, JIANG Yueqiang, YANG Zenghui, et al. Application study of series reactor current-limiting technology[J]. East China Electric Power, 2005, 33(5): 18-22.
- [7] 薛敏,卢波,黄华,等.首台 500 kV 线路串联电抗器在华东电网的应用研究[J].华东电力,2008, 36(11):47-50.
XUE Min, LU Bo, HUANG Hua, et al. Application of the first 500 kV series reactors to east China power grid[J]. East China Electric Power, 2008, 36(11): 47-50.
- [8] 贾磊,蔡汉生,胡上茂,等.500 kV 串联电抗器对线路断路器开断能力的影响研究[J].南方电网技术,2014, 8(6):7-11.
JIA Lei, CAI Hansheng, HU Shangmao, et al. Study on influence of 500 kV series reactor on interrupting capability of line circuit breaker[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 7-11.
- [9] 陈水明,许伟,王振兴,等.500 kV 限流电抗器对瞬态电压的影响及限制措施[J].华北电力技术,2008(1):11-15.
CHEN Shuiming, XU Wei, WANG Zhenxing, et al. Effects of 500 kV current-limiting inductors on transient recovery voltage and its countermeasures[J]. North China Electric Power, 2008(1): 11-15.
- [10] 胡泰山,蔡汉生,刘刚,等.500 kV 限流电抗器接入 90 kA 短路电流系统时瞬态恢复电压抑制分析[J].南方电网技术,2019, 13(12):53-59.
HU Taishan, CAI Hansheng, LIU Gang, et al. Analysis of transient recovery voltage restrictive measures when 500 kV current limiting reactor connected to 90 kA short-circuit current system[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(12): 53-59.
- [11] 高压交流断路器:GB 1984—2014[S]. 2014.
High - voltage alternating - current circuit - breakers: GB 1984—2014[S]. 2014.
- [12] 电力电容器产品型号编制方法 第 1 部分:电容器单元、集合式电容器及箱式电容器:JB/T 7114. 1—2013 [S]. 2013.
Rules for determination of the types of power capacitor products—Part 1: Capacitier unit, capacitor of the assembling type and capacitor of tank type:JB/T 7114. 1—2013[S]. 2013.
- [13] Capacitors for high-voltage alternating current circuit-breakers—Part 2:TRV capacitors:IEC 62146—2[S]. 2013.
- [14] 绝缘配合 第 1 部分:定义、原则和规则:GB/T 311. 1—2012 [S]. 2012.
Insulation co-erdination—Part 1:Definitions,principles and rules:GB/T 311. 1—2012 [S]. 2012.
- [15] 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第 1 部分:定义、信息和一般原则:GB/T 26218. 1—2010 [S]. 2010.
Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditings—Part 1: Definitions, information and general principles:GB/T 26218. 1—2010 [S]. 2010
- [16] 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第 2 部分:交流系统用瓷和玻璃绝缘子:GB/T 26218. 2—2010 [S]. 2010.
Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditings—Part 2: Ceramic and glass insulators for a. c. systems:GB/T 26218. 2—2010 [S].

- 2010.
- [17]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.
- [18]郭天兴,吴俊莉,张建平. 有限元法在标准电容器电场计算中的应用[J]. 电力电容器,2004(1):3-8.
- GUO Tianxing, WU Junli, ZHANG Jianping. The application of finite element methods to electric field calculation in the standard capacitor[J]. Power Capacitor, 2004(1): 3-8.
- [19]汪冬梅. 高压电力电容器物理场计算分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.
- [20]张炜,杨国华,李勇杰,等. 高海拔地区特高压换流站典型电极起晕特性与均压屏蔽电极设计[J]. 高压电器,2022,58(4):42-49.
- ZHANG Wei, YANG Guohua, LI Yongjie, et al. Typical electrode corona characteristics and design of volge equalization shielding electrodes for ultra-high voltage converter stations in high-altitude areas[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(4):42-49.
- [21]王新宇,王胜辉,杨广发,等. 降雨条件球电极表面电晕放电特性的试验研究[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2018,45(5):16-25.
- WANG Xinyu, WANG Shenghui, YANG Guangfa, et al. Experimental study on surface corna discharge characteristics of ball electrodes under rainfall conditions[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2018, 45(5): 16-25.
- [22]王益博,杨乐,孟忠,等. 基于ANSYS Workbench的均压环断裂分析[J]. 新技术新工艺,2018(4):67-69.
- WANG Yibo, YANG Le, MENG Zhong, et al. Grading ring fracture analysis based on ANSYS workbench[J]. New Technology & New Process, 2018(4): 67-69.
- [23]董彦辰,何柏娜,贺兴民,等. 分闸电阻对单相重合闸瞬态恢复电压影响研究[J]. 高压电器,2023,59(5):170-177.
- DONG Yanchen, HE Baina, HE Xingmin, et al. Study on influence of opening resistance on transient recovery voltage of single-phase reclosing operation[J]. High Voltage Apparatus, 2023,59(5):170-177.
- [24]辛妍丽,周文婷,余泽远,等. 40.5 kV 真空断路器分闸并联电抗器重燃过电压及抑制方法[J]. 电力工程技术,2023,42(4):231-240.
- XIN Yanli, ZHOU Wenting, YU Zeyuan, et al. Reignition overvoltages caused by 40.5 kV vacuum circuit breaker switching-off shunt reactors and suppression methods[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023,42(4):231-240.
- [25]王博文,王龙飞,董炜,等. 受端电网暂态失稳场景识别及控制措施优化[J]. 浙江电力,2023,42(4):71-78.
- WANG Bowen, WANG Longfei, DONG Wei, et al. Recognition of transient instability scenarios of the receiving-end grid and control strategy optimization[J]. Zhejiang Electric Power, 2023,42(4):71-78.
- [26]杨兵,刘少飞,方太勋,等. 快速开关限流型交流母线电压保持设备研究[J]. 高压电器,2023,59(12):48-54.
- YANG Bing, LIU Shaofei, FANG Taixun, et al. Research on current-limiting type AC bus voltage maintaining equipment with high-speed switch [J]. High Voltage Apparatus, 2023,59(12):48-54.
- [27]何聪,张炜,李良书,等. 交流叠加冲击电压下环氧绝缘内部气隙局部放电特性[J]. 电网与清洁能源,2023,39(3):33-39.
- HE Cong, ZHANG Wei, LI Liangshu, et al. PD characteristics of void in epoxy insulation under AC and impulse superimposed voltage[J]. Power System and Clean Energy, 2023,39(3):33-39.
- [28]刘鉴雯,吴在军,曹骁勇,等. 计及系统过电压的直流配电网接地方式选择与绝缘配置[J]. 电力工程技术,2023,42(3):19-26.
- LIU Jianwen, WU Zaijun, CAO Xiaoyong, et al. Grounding mode selection and insulation configuration of DC distribution network considering system overvoltage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023,42(3):19-26.
- [29]电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013 [S]. 2013.
- Cod for seismic design of building structures:GB 50260—2013 [S]. 2013.
- [30]特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震安装与维护技术规程:Q/GDW 11132—2013 [S]. 2013.
- Technical specification for seismic design and installation and maintenance of shock absorbing devices for ultra high voltage porcelain insulated electrical equipment: Q/GDW 11132—2013 [S]. 2013.

作者简介:

莫华明(1978—),男,高级工程师,主要从事互感器和电力电容器研发设计工作。

王增文(1967—),男,正高级工程师,主要从事互感器和电力电容器研发设计工作。

刘雁兵(1982—),男,工程师,主要从事互感器和电力电容器研发设计工作。

莫锐(1993—),男,工程师,主要从事互感器和电力电容器成套设备的技术研发工作。

黄有祥(1964—),男,正高级工程师,主要从事互感器和电力电容器成套设备的技术研发工作。