

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.05.002

500 kV 线路限流电抗器保护用电容器装置的研制

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

摘要: 针对变电站出现系统故障时, 与之相连的线路断路器的瞬态恢复电压(TRV)陡度会瞬间提高, 影响断路器的正常开断。为了解决这一问题, 本文设计了一种在 500 kV 线路上对限流电抗器起抑制谐波、限制合闸涌流等作用的保护电容器装置(简称“电容器装置”)。首先, 对电容器装置的工作原理及设计方案进行说明; 其次, 开展了静力强度、抗震性能和电场仿真计算, 仿真结果表明均满足设计要求; 最后, 该装置一次性成功通过全套型式试验项目, 满足相关标准及技术条件要求。

关键词: 限流电抗器; 电容器装置; 仿真; 机械强度; 电场计算

Development of Capacitor for 500 kV Line Current-limiting Reactor Protection

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

Abstract: In case of system fault in substation, the transient recovery voltage steepness of circuit breaker connected to the system increases instantly and affects normal interruption operation of the circuit breaker. For solving this problem, a kind of protection capacitor device (“capacitor device” in short) with such functions as harmonic suppression and limit of closing inrush current of current limiting reactor on the 500 kV transmission line is designed in this paper. First of all, both operating principle and design scheme of the capacitor device are described; Then, the static strength, seismic performance and electric field simulation calculations are performed and the simulation shows that they meet the design requirement; Finally, the device passes the complete set of type test items one time and meets the requirements of related standards and technical specification.

Keywords: current limiting reactor; capacitor device; simulation; mechanical strength; electric field calculation

0 引言

近年来, 随着国内电力行业的高速发展和电力电子器件的大量使用, 使得电网中非线性负荷越来越多, 这些非线性负荷带来大量不利于电网正常运行的各种谐波, 尽可能地消除或减少谐波的危害成为亟待解决的突出问题^[1-2]。

因出于对抑制谐波、限制合闸涌流和滤除谐波等因素的考虑, 需要在某些 220 kV 或 500 kV 线路装设限流电抗器。在变电站某些特殊的运行方式下, 若出现系统故障时, 与之相连的线路断路器的瞬态恢复电压(TRV)陡度会瞬间提高, 大大超过断路器标准中瞬态恢复电压陡度规定值, 从而可能影响断路器的正常开断。为了降低系统故障时线路

断路器的 TRV 陡度, 有利于线路断路器开断, 需在限流电抗器两端并联连接电容器装置。笔者描述的就是一种在 500 kV 线路上对限流电抗器起抑制谐波、限制合闸涌流等作用的保护电容器装置^[3-4](以下简称“电容器装置”)。

1 限流电抗器用电容器装置的工作原理

在变电站或开关站的电路图中可以看出, 电容器装置并联连接在线路中限流电抗器的两端, 若变电站在进行某些特殊的操作或者系统故障时, 线路中断路器的 TRV 陡度会瞬间提高, 大大超过断路器瞬态恢复电压陡度的规定值, 从而可能影响断路器的正常开断。若在限流电抗器的两端并接电容器装置, 可降低特殊操作或故障时线路断路器的 TRV

收稿日期: 2023-05-22

陡度,有利于线路断路器开断,同时电容器装置自身还具有对限流电抗器起抑制谐波、限制合闸涌流等作用^[5-6]。

电容器装置在 500 kV 系统线路中的具体接线图见图 1。

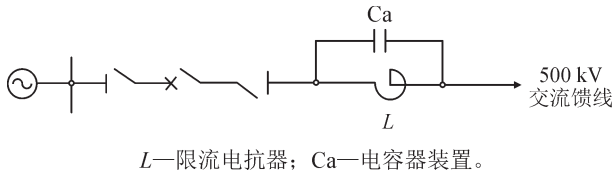


图1 限流电抗器的电容器装置接线图

Fig. 1 Wiring diagram of capacitor device for the current-limiting reactor

2 电容器装置的参数要求

在限流电抗器两端并联的电容器装置,其额定电压、过负荷能力、绝缘水平应与限流电抗器保持一致。依托相关的工程项目作为支撑,选用某一个限流电抗器项目上的技术参数作为依据,结合耦合电容器、电容式电压互感器的制作经验及工程实例研制一种 500 kV 限流电抗器的电容器装置,用于限制瞬态恢复电压。选用的电容器装置应并联在限流电抗器的两端,保证一次进线端及线路返回端均满足 500 kV 设备的外绝缘要求,考虑到瞬间合闸的过电压状况,该项目不设置中间接地点,但需保证 550 kV 的外绝缘要求,故要求配备满足电压、爬电距离、机械特性的 550 kV 支柱绝缘子^[7-8]。

根据上述要求,结合耦合电容器的相关标准及制造经验,将保护电容器装置的型号确定为 TOFF500/ $\sqrt{3}-0.06\text{H}$ 。该装置由电容器单元通过串并联方式进行叠装,并与支柱绝缘子装配在一起组成^[9-13]。

电容器装置的基本参数见表 1。

表 1 电容器装置参数	
Table 1 Parameters of capacitor device	
名称	参数
型式	单相、户外、叠装式
额定电压/kV	500
额定最大连续运行电压/kV	550
额定频率/Hz	50
额定总电容量/ μF	0.06
单相电容器单元串并数	Ca 电容器:3 串 3 并
均压环管母/mm	$\phi 100$
金具/mm	$\phi 520$
污秽等级	e 级
绝缘水平/kV	740/1 550/1 300
适用海拔/m	$\leq 1\,000$
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	$(-40\sim 45)$
最大风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	≤ 42
覆冰厚度/mm	≤ 10
地震烈度/度	≤ 8
	$\leq 0.2\text{ g}$ (水平)
	$\leq 0.16\text{ g}$ (垂直)

最终确定产品的设计方案为:保护电容器装置由 9 节电容器单元(3 串 3 并)、18 节支柱绝缘子单元(3 串 6 并)、均压环、降噪装置、安装板及基座组成。电容器装置见图 2,电容器单元见图 3。

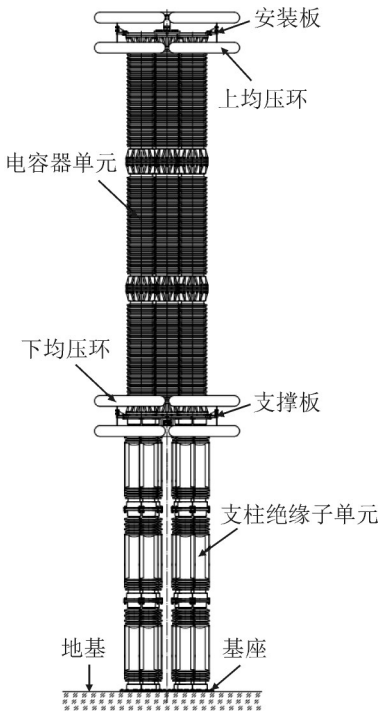


图2 电容器装置

Fig. 2 Capacitor device

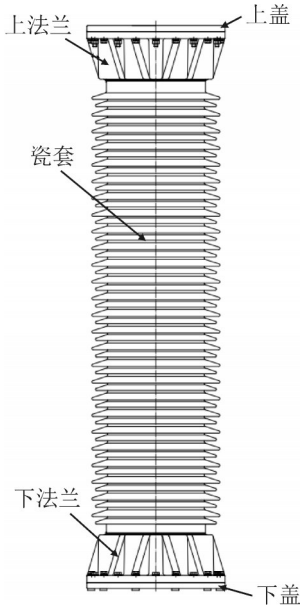


图3 电容器单元

Fig. 3 Capacitor unit

3 机械强度计算

为确保电容器装置满足需求,并尽可能地降低开发成本,减少开发周期,按照方案绘制三维模型图,采用 MSC.NASTRAN 软件进行机械强度验算和

耐地震性能动态计算分析^[14]。

3.1 材料参数的选择

在建模过程中,电容器装置中的电容器单元套管和支柱绝缘子的材料采用高压电瓷材料,其质量密度采用等效值法,以保证模型与实际结构质量相等。电容器装置中的法兰、均压环的材料设置为铝,安装板的材料设置为铝合金。仿真模型所需材料参数见表 2^[15]。

表2 仿真模型所需材料参数
Table 2 Material parameters required for simulation model

类别	密度/(kg/m ³)	应力/(N/m ²)	泊松比/ μ	破坏应力 σ /MPa
套管	2.960×10 ³	1.10×10 ¹¹	0.35	50
支柱绝缘子	2.960×10 ³	1.10×10 ¹¹	0.35	50
法兰	2.7×10 ³	(0.7~1.0)×10 ¹¹	0.32~0.36	400
均压环	2.7×10 ³	(0.7~1.0)×10 ¹¹	0.32~0.36	400
支撑板	2.7×10 ³	(0.7~1.0)×10 ¹¹	0.32~0.36	500

3.2 固有特性计算

对电容器装置的模态进行计算。其前十阶模态的固有频率和振型特征描述列见表 3,典型振型图见图 4。从模态计算结果可以看出,电容器装置结构的基频较低,且模态密集,15 Hz 内有 10 阶模态。前十阶模态中包含 9 个整体弯曲模态和 1 个扭转模态。前十阶模态的固有频率在强震频段(2~15 Hz)之内。

表3 电容器装置的固有频率
Table 3 Natural frequencies of capacitor device

模态	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶	7阶	8阶	9阶	10阶
频率	1.389 5	1.389 9	3.958 7	3.960 5	4.571 2	6.499 1	7.604 9	7.635 8	11.729	12.117
振型	弯曲 一阶	弯曲 一阶	弯曲 二阶	弯曲 二阶	扭转 一阶	弯曲 三阶	弯曲 三阶	弯曲 三阶	弯曲 三阶	弯曲 三阶

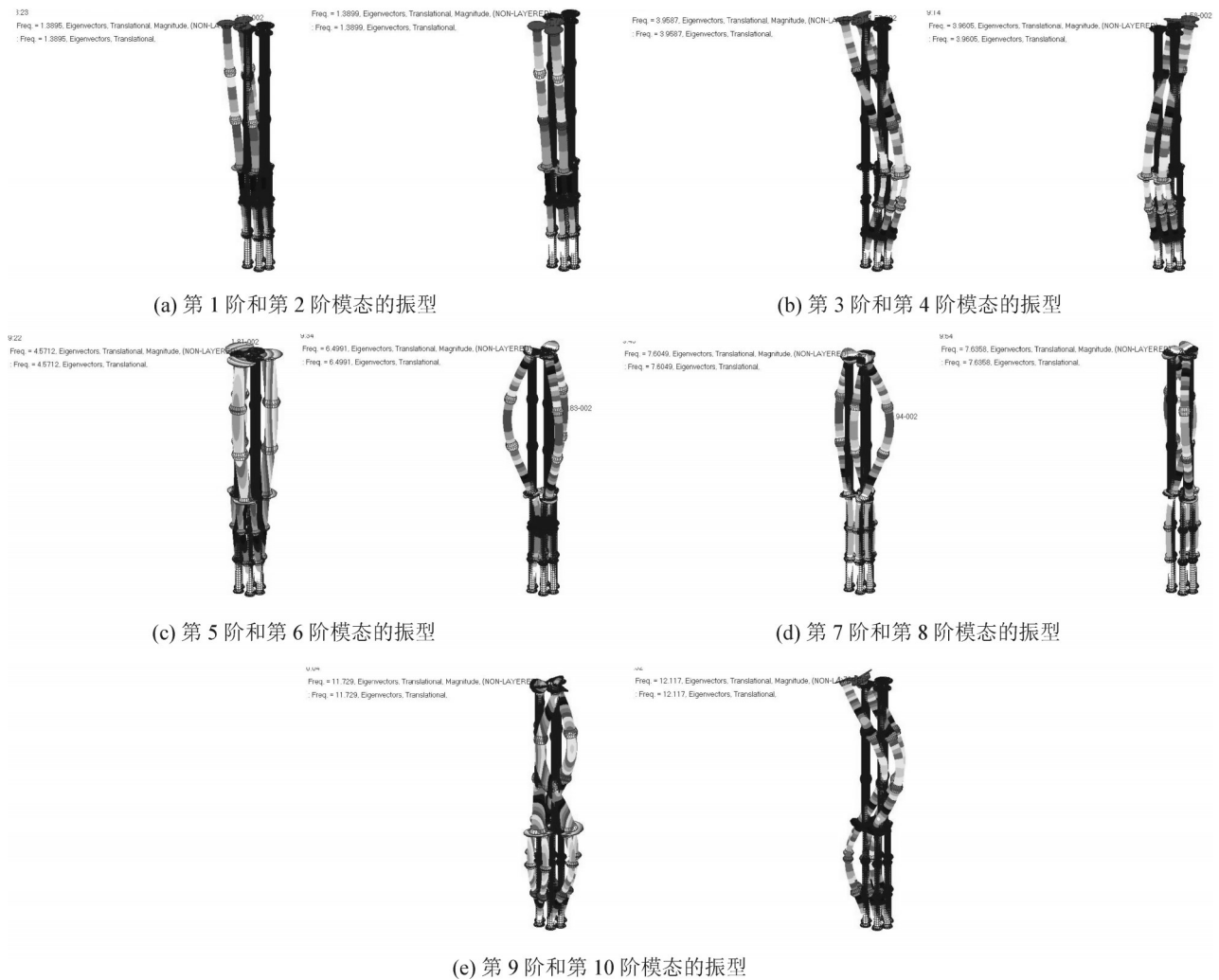


图4 电容器装置的典型振型图
Fig. 4 Typical vibration mode diagram of capacitor device

3.3 静力计算

设备承受的静力一般可分为产品自身重力、顶部端子拉力和风荷载3种,其中电网对500 kV一次设备的静态端子拉力(水平纵向、水平横向、垂直)要求为至少不小于3 000 N。

常规风荷载计算时的风速按照100年一遇的最大风速42 m/s(10 m高处,10 min)计算,基本风压值 w_0 公式为^[16-19]

$$w_0 = \frac{v_0^2}{1\ 600} = 1.102\ 5\ \text{kN/m}^2 \quad (1)$$

作用在建筑物表面上的风荷载标准值 w_k 公式为

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0\ \text{kN/m}^2 \quad (2)$$

式中: β_z 为高度 Z 处的风振系数; μ_s 为风荷载体型系数; μ_z 为风压高度变化系数。以上参数的选取参考《建筑结构荷载规范》^[20]。

3.3.1 校核方法

电容器装置的瓷件所用的材料是高强度高压电瓷,属于脆性材料,采用最大拉应力理论来校核其强度,而其他韧性材料则采用 Von Mises 准则校核。

最大拉应力理论:在复杂应力状态下,材料的极

限状态取决于所受的最大拉应力,此强度理论适用于校核脆性材料的脆性断裂,其强度条件可表示为

$$n \cdot \bar{\sigma} \leq [\sigma_{\text{拉}}] \quad (3)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为最大主应力; $[\sigma_{\text{拉}}]$ 为容许拉应力。

Von Mises 准则:在复合应力状态下,材料单位体积内储存的应变能等于单向拉伸下使材料屈服的单位体积应变能时,材料发生破坏,其强度条件可表示为

$$n \cdot \bar{\sigma} \leq [\sigma_{\text{拉}}] \quad (4)$$

式中: $\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ (σ_1, σ_2

和 σ_3 为主应力); $[\sigma_{\text{拉}}]$ 为容许拉应力; n 为设定的安全系数。

3.3.2 静力强度计算

电容器装置承受组合载荷(重力+风载荷+端子拉力)的静力计算结果见表4。表中所列为电容器装置的主要部件,套管应力为电容器单元的瓷套应力,底部法兰为电容器单元的下法兰,上部法兰为电容器单元的上法兰。

表4 组合载荷下的静力计算结果
Table 4 Static calculation results under combined load

项目	支柱绝缘子应力/ MPa	套管应力 /MPa	底部法兰 应力/MPa	上部法兰 应力/MPa	支撑板 应力/MPa	顶部最大位移/m
计算结果	7.73	5.57	39.2	38.8	56.10	0.059 4
强度极限	50.00	50.00	400.0	400.0	500.00	—
安全系数	6.47	8.98	10.1	10.3	8.91	—

注:静力作用安全系数:2.50。

电容器装置在组合载荷下,电容器单元的套管应力最大值出现在最下节套管的底部;支柱绝缘子的应力最大值出现在最上节绝缘子的顶部,承受应力最大值7.73 MPa,其材料的强度极限为50 MPa,该最大值小于材料的允许拉应力值,安全系数为6.47。支撑板承受应力最大值56.1 MPa,其材料的强度极限为500 MPa,该最大值小于材料的允许拉应力值,安全系数为10.3。安全系数均大于2.50(静力作用安全系数),静力强度符合要求。

4 抗震性能计算

按照《特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震装置安装与维护技术规程》(Q/GDW 11132—2013)的要求,设备应直接安装在地坑或地面运行,采用地震波

时程激励进行校核。本次时程分析,采用地震波的最大加速度,水平方向为0.35 g,垂直方向为0.28 g,其样本时间历程如图5所示。另外,在计算中也考虑了重力、顶部端子拉力和25%的风载荷的作用^[16-20]。

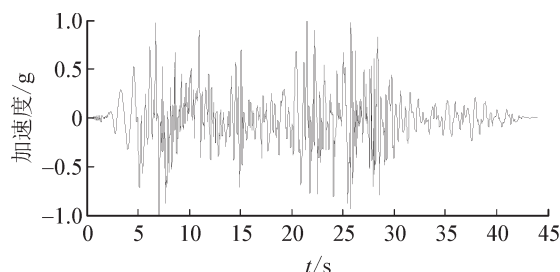


图5 激励时程波(峰值加速度为1.0 g,根据抗震水平等级比例放大波形)

Fig. 5 Excitation time history wave (peak acceleration is 1.0 g, amplified proportionally according to seismic level)

按照《电力设施抗震设计规范(GB 50260—2013)》,不考虑底部支座的具体结构,在计算结果中要求引入动力放大系数 1.4。电容器装置的应力计算结果见表 5。

表 5 组合载荷下的动态计算结果
Table 5 Dynamic calculation results under combined loads

项目	支柱绝缘子应力/MPa	套管应力/MPa	底部法兰应力/MPa	上部法兰应力/MPa	支撑板/MPa	顶部最大加速度/(m/s ²)
计算结果	19.80	16.10	135.00	108.00	153.00	13.5
折合应力	27.70	22.50	189.00	151.00	214.00	—
强度极限	50.00	50.00	400.00	400.00	500.00	—
安全系数	1.81	2.22	2.12	2.65	2.34	—

注:动态安全系数:1.67。

电容器装置在组合载荷下,电容器单元的套管应力最大值出现在最下节套管的底部;支柱绝缘子的应力最大值出现在最上节绝缘子的顶部,承受折合应力最大值 27.7 MPa,其材料的强度极限为 50 MPa,该最大值小于材料的允许拉应力值,安全系数为 1.81。支撑板承受折合应力最大值 214 MPa,其材料的强度极限为 500 MPa,该最大值小于材料的允许拉应力值,安全系数为 2.34。安全系数均大于 1.67(规范中动荷载作用下的安全系数),结构满足《电力设施抗震设计规范(GB 50260—2013)》规定的 0.2 g 抗震等级强度要求。

5 电场计算

对电容器装置构造有限元模型并采用 ANSYS 软件进行电场分析,计算出电容器装置整体和各部件的表面电场情况^[21-23]。

5.1 计算方法

仿真计算主要针对两种情况下的电场分布。一是从整体布局出发,以模型对整个装置进行覆盖性电场核算,计算电场分布;二是从局部结构出发,对保护电容器装置中的各个部件的电场情况进行计算。

电晕起始场强 E_c 根据电极形状的不同而有所差异,一般常见的电极有柱状电极,如高压管母;以及球状电极,如管母的封端盖。因此,电晕起始场强 E_c 可以根据比克(F.W.PEEK)提出的不同电极结构的 E_c 经验公式来计算^[24-27]。

1)柱形导体

电极表面电晕起始场强 E_c (峰值)公式为

$$E_c = 30.3m\delta \left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{r\delta}}\right) \text{ kV/cm} \tag{5}$$

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。
电容器装置中,均压环半径为 10 cm,表面粗糙系数 m 取 1,可以得到均压环表面的电晕起始电场强度 E_c 有效值为 23.4 kV/cm。金具半径为 25 cm,表面粗糙系数也为 1,金具电晕起始电场强度有效值为 22.7 kV/cm。

因此,为使电容器装置不出现明显的电晕放电,其电场强度需小于电晕起始电场强度。为了留有一定的设计裕度,要求将金具和均压环等结构表面的最大电场强度控制上限值提高到在 15 kV/cm 以内。

2)海拔对电晕起始电场的影响

δ 为相对空气密度,在零海拔下 δ 为 1,均压环与金具表面电晕起始电场分别为 23.4 kV/cm 与 22.7 kV/cm。当海拔为 1 000 m 时, δ 为 0.903,电晕起始电场分别降低为 21.2 kV/cm 与 20.6 kV/cm,当海拔为 4 000 m 时, δ 为 0.653,电晕起始电场分别降低为 15.7 kV/cm 与 15.1 kV/cm,详见表 6。通过对电容器装置各部件的电极形状进行近似处理后,通过经验公式计算出电晕起始场强。

表 6 海拔与空气密度关系
Table 6 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	1.000	0.903	0.813	0.770	0.730	0.653	0.583

5.2 电场计算结果

电容器装置所有金属导体表面的电场仿真结果见图 6,施加电压单位为 kV,建模尺寸单位为 mm,故电场强度单位为 kV/mm。整个结构的最大电场强度位于下均压环的下表面附近,如图中红色圆形标记处,最大值为 0.955 kV/mm,即 9.55 kV/cm。

从距地 1.5 m 处,电容器装置的整体电场强度分布可知,电场强度最高出现在金具的表面附近,约为 0.09 kV/mm,即 0.9 kV/cm。在以装置为中心

的广大范围区域内电场强度在 0.03~0.04 kV/mm 之间,即 0.3~0.4 kV/cm。电容器装置的电场仿真结果见图 7。

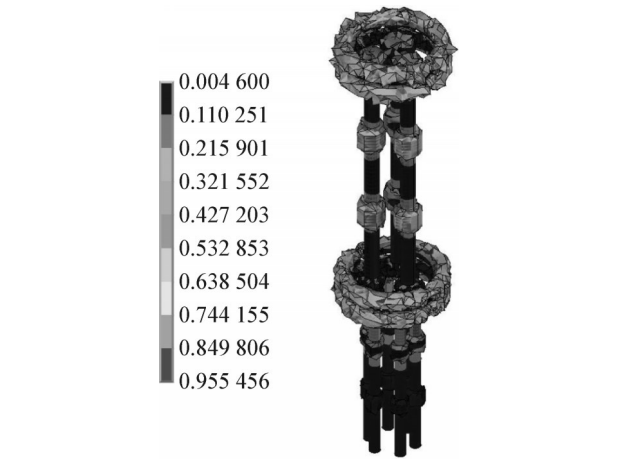


图6 电容器装置的电场仿真结果
Fig.6 Electric field simulation results of capacitor device

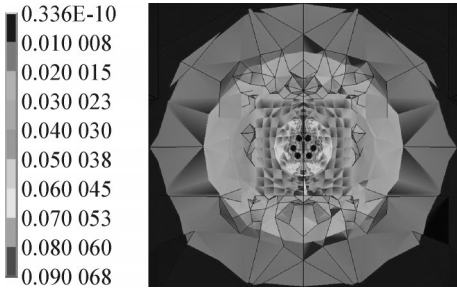


图7 距地 1.5 m 处电容器装置电场分布仿真结果
Fig.7 Simulation results of electric field distribution of capacitor device at 1.5 m from the ground

由电场计算结果表 7 可以看出,电容器装置的最大电场强度为 9.55 kV/cm,位于下均压环的下表面附近,小于海拔 4 000 m 下的均压环柱形电极的电晕起始场强值 15.7 kV/cm。电容器装置的其他部位的电场强度均远小于各自的电晕起始场强值,因此电容器装置的电场强度符合要求,不会产生电晕。

表 7 电容器装置的电场计算结果
Table 7 Electric field calculation result of capacitor device

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	1 000 m	4 000 m	
电容器装置	9.55	23.4	21.2	15.7	—
均压环 $\phi 100$	9.55	23.4	21.2	15.7	柱形导体
层间绝缘子	2.83	4	4	4	—
金具	6.35	22.7	20.6	15.1	柱形导体

依照设计思路、机械强度仿真及电场计算的结果,将方案优化后投入制作一台样机,一次性通过全套型式试验项目,所以有指标均满足相关标准及技术条件要求。

6 结语

- 1)文章设计了电容器装置的基本结构,搭建了三维模型,通过组合载荷(自身重力、风荷载和顶部端子拉力)的静力强度计算,结果显示静态安全系数均大于 2.50。
- 2)通过加入地震波的组合载荷下的抗震性能计算,结果显示其动态安全系数均大于 1.67,且满足《电力设施抗震设计规范(GB 50260—2013)》规定的 0.2 g 抗震等级强度要求。
- 3)采用有限元模型的电场仿真分析可知该电容器装置的最大电场强度为 9.55 kV/cm,符合电晕起始场强不超过 15.7 kV/cm 的要求,不会产生电晕。
- 4)根据仿真结果优化后的样机一次性通过全套型式试验项目,并满足相关标准及技术条件要求。

参考文献

[1] 绝缘配合第2部分:高压输变电设备的绝缘配合使用导则:GB/T 311.2—2013[S]. 2013.
Insulation co-ordination Part 2: Application guide for insulation co-ordination for high voltage transmission and distribution equipment: GB/T 311.2—2013[S]. 2013.

[2] 房金兰. 关于电容式电压互感器技术发展的探讨[J]. 电力电容器与无功补偿,2013,34(1):1-6.
FANG Jinlan. Discussion on technical development of capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(1): 1-6.

[3] 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):76-84.
CAI Hui, QI Wanchun, WANG Weiyuan, et al. Application research of series reactor current limiting technology in Jiangsu power grid [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39 (1): 76-84.

[4] 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(5):24-31.
ZHU Ruijin, JIANG Yueqiang, YANG Zenghui, et al. Application research of series reactor current limiting technol-

- ogy [J]. East China Electric Power, 2005(5):24-31.
- [5] 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):36-43.
- HU Taishan, CAI Hansheng, LIU Gang, et al. Analysis of transient recovery voltage suppression when a 500 kV current limiting reactor is connected to a 90 kA short-circuit current system [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13 (12):36-43.
- [6] 张媛,金铭,李山,等. 220 kV 限流电抗器对线路过电压的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3):13-18.
- ZHANG Yuan, JIN Ming, LI Shan, et al. The impact of 220 kV current limiting reactors on line overvoltage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39 (3):13-18.
- [7] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- [8] 国家机械工业局. 保护电容器及电容分压器[M]. 北京:机械科学研究院出版社, 2001.
- [9] 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 voltage dividers—Part 1: General rules: GB/T 19749. 1—2016[S]. 2016.
- [10] 互感器 第5部分 电容式电压互感器的补充技术要求: GB/T 20840. 5—2013[S]. 2013.
- Instrument transformers—Part 5: Additional requirements for capacitor voltage transformers: GB/T 20840. 5—2013[S]. 2013.
- [11] 黄建华,李长益. 华东电网 500 kV 电容式电压互感器的运行现状及其分析[J]. 高压电器, 2004, 40(1):58-60.
- HUANG Jianhua, LI Changyi. Present situation and analysis of 500 kV CVT operating in eastern China electric power system[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(1):58-60.
- [12] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
- [13] 于海年. 互感器原理与设计基础[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 2003.
- [14] 于群,曹娜. Matlab/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [15] 杨章俊. 电容式电压互感器工作原理及试验方法分析[J]. 科技创新与应用, 2015(31):194-194.
- YANG Zhangjun. Analysis of the working principle and testing methods of capacitive voltage transformers[J]. Technology Innovation and Application, 2015(31):194-194.
- [16] 特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震装置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.
- [17] 刘阳,魏峰,聂志强,等. 500 kV 电容式电压互感器抗震试验[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(4):61-64.
- LIU Yang, WEI Feng, NIE Zhiqiang, et al. Seismic test of 500 kV capacitive voltage transformer [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(4):61-64.
- [18] 刘亚光. 基于 CFD 的船舶动态风载荷的建模与仿真[D]. 大连:大连海事大学, 2016.
- [19] 电力设施抗震设计规范: GB 50260—2013[S]. 2013.
- Code for seismic design of electric power facilities: GB 50260—2013[S]. 2013.
- [20] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 2012.
- Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. 2012.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 曹庆文,李宁,董连文,等. GIS 电容式电压互感器的电场数值计算[J]. 电力电容器, 2003(4):11-14.
- CAO Qingwen, LI Ning, DONG Lianwen, et al. Numerical calculation of electric field for GIS capacitive voltage transformers [J]. Power Capacitor, 2003(4):11-14.
- [24] 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 voltage equalization shielding electrodes for ultra-high voltage converter stations in high-altitude areas [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58 (4):42-49.
- [25] 王新宇,王胜辉,杨广华,等. 降雨条件下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 Guanghua, et al. Experimental study on surface corona discharge characteristics of ball electrodes under rainfall conditions [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(5):16-25.
- [26] 刘晓明,龚立群,贾茹. 550 kV 电容式电压互感器的均压设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(1):66-75.
- LIU Xiaoming, GONG Liqun, JIA Ru. Equalization design of 550 kV capacitive voltage transformer [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, 34(1):66-75.
- [27] 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. Analysis of equalization ring fracture based on ANSYS Workbench [J]. New Technology & New Process, 2018(4): 67-69.

作者简介:

杨硕亮(1985—),男,工程师,主要从事电容式电压互感器、耦合电容器的技术工作。E-mail: 332640299@qq.com。

赵莹(1976—),女,工程师,主要从事电容式电压互感器、耦合电容器的技术工作。

杨茜(1982—),女,工程师,主要从事电流、电压互感器的技术工作。

杨晓静(1986—),女,工程师,主要从事电容式电压互感器、耦合电容器的技术工作。

杨永刚(1988—),男,工程师,主要从事电容式电压互感器、耦合电容器的技术工作。

任春阳(1967—),男,正高级工程师,主要从事电容式电压互感器、耦合电容器及电流互感器的技术工作。

《电力电容器与无功补偿》2024 年 5 期广告单位

1 合容电气股份有限公司	封面	11 山东海源泰和电气有限公司	前插 7
2 上海思源电力电容器有限公司	封二	12 赛晶科技集团有限公司	前插 8
3 山东哈大电气有限公司	封三	13 陕西泰普瑞电工技术有限公司	前插 9
4 深圳市三和电力科技有限公司	封底	14 桂林明富金属股份有限公司	前插 10
5 深圳市紫宸激光设备有限公司	前插 1	15 温州市凯泰特种电器有限公司	前插 11
6 辽宁芯峻电气有限公司	前插 2	16 日新电机(无锡)有限公司	前插 12
7 杭州精诚电力设备有限公司	前插 3	17 10月22日世界传统医药日	前插 13
8 新程(辽宁)电力电容器科技有限公司	前插 4	18 西安高压电器研究院股份有限公司(认证中心)	前插 14
9 陕西凯瑞宏星电器有限公司	前插 5	19 西安高压电器研究院股份有限公司(业务)	前插 15
10 西安金叶电力科技有限公司	前插 6	20 西安唯实输配电技术有限公司	前插 16