

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.02.004

一起 500 kV 串补电容器组不平衡电流高定值旁路故障分析

宋云祥, 陈光, 罗赞琛, 曾星宏, 杨政

(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司南宁局, 南宁 530021)

摘要: 近期网内某 500 kV 串补站发生了数次串补电容器组不平衡电流高定值动作导致旁路故障的情况, 本文通过研究该串补站电容器组不平衡电流动作机理及保护方式, 结合故障录波分析, 判断故障原因及故障类型, 并通过故障模拟仿真进行了验证, 然后针对该故障类型特点选择极间直流电压试验成功排查出故障电容器单元, 并经解体检查证实。现场实际表明, 该方法可有效排查出文中提到的瞬时性恢复故障, 为日后运维人员处理该类型故障提供借鉴。

关键词: 不平衡电流; 串补电容器; 恢复性瞬时故障; 电容单元; 检测方法

Analysis of Unbalance Current High Setting Pass Fault of 500 kV Series Compensating Capacitor Bank

SONG Yunxiang, CHEN Guang, LUO Zanchen, ZENG Xinghong, YANG Zheng

(Nanning Bureau of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd.,
Nanning 530021, China)

Abstract: Recently, the bypass faults due to several high constant of unbalanced current of capacitor banks has occurred in a 500 kV series compensating station in the power grid in China. In this paper, the cause and type of the fault are judged by way of studying operation mechanism and protection mode of unbalanced current of capacitor bank of the series compensation station in combination with fault record analysis. The verification is made by the fault simulation. Then, the fault capacitor unit is successfully detected by the inter-electrode DC voltage test in accordance with the characteristics of the fault type and verified by disassembly inspection. The actual results at site show that this method can effectively troubleshoot the transient recovery faults mentioned in the paper, and provide reference for operation and maintenance personnel to deal with this type of faults in the future.

Keywords: unbalanced current; series compensation capacitor; restorative instantaneous fault; capacitive unit; detection method

0 引言

随着我国对电力的需求越来越大, 电压等级随之越来越高, 超高压长距离的输电方式已普遍应用, 为提高线路的输送能力, 增进系统稳定性, 串联补偿技术已经被广泛应用于电力系统当中^[1-6]。串联补偿是一种将无功补偿装置通过串联的方式接入线路进行无功补偿的技术^[7-8], 一般分为可控串补和固定串补两种方式, 一般由电容器组、MOV、触发间隙、阻尼装置、CT 等组成。其中电容器组作为其

核心元件, 具有容量大、单元数量多、电压等级高等特点^[9-12]。

串补电容器组由双 H 型桥连接构成, 实际运行过程中通常采用桥差不平衡电流互感器进行检测, 作为电容器组的主保护。当不平衡电流超过整定值时, 保护告警并动作将串补旁路。当发生该故障时, 常规停电检查采用电容器单元电容值、极对壳绝缘电阻、桥臂电容平衡度、不平衡 CT 校核进行检测手段, 判断设备健康度^[13-15]。

本文是对一起 500 kV 某站串补线路不平衡动作

故障进行分析,通过录波分析、模拟仿真、分析系统及设备结构原理,进而提出一种通过端子间施加直流电压试验方法,通过现场试验验证了该方法的可行性。

1 串补电容器组不平衡动作方式

该站串补结构如图1所示, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为串补电容器组的4个桥臂,采用桥型接线方式,每个臂由44个电容器单元组成,臂接线为4串11并的方式, I_{unb} 为不平衡电流互感器,用以检测流经电容器组的不平衡电流^[16-17]。

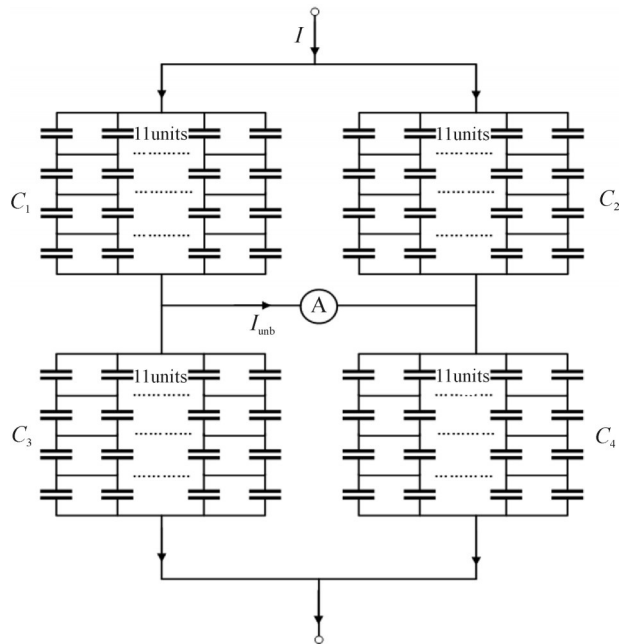


图1 串补电容器组接线原理图
Fig. 1 Wiring schematic diagram of series compensation capacitor bank

电容器安装时根据各单元实际参数进行计算,并进行配平,使得4个桥臂参数均相等。理想情况下不会有电流流经不平衡电流互感器,当某个桥臂出现电容器单元故障时,桥臂不再保持平衡,届时会有不平衡电流产生。电容器主保护则利用该原理进行保护,采用告警、低定值旁路和高定值旁路,其中高定值设定电流整定值作为动作值,达到整定值后经短延时动作出口^[18-20]。

2 某500 kV串补站电容器组不平衡电流高定值动作情况分析

该串补站最近一次于2021年7月发生不平衡电流高定值动作,共计发生4次,分别发生于2020年12月(1次)、2021年5月(1次)、7月(2次)间隔时间由月逐渐缩短,动作后将串补三相旁路,永久闭

锁,检查无系统外部故障,装置采用固定串补,串补结构方式如图2所示。

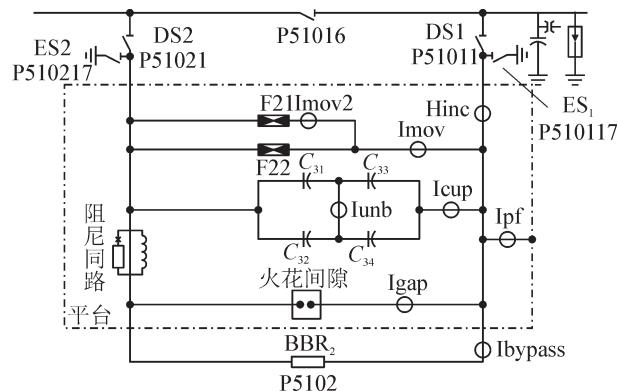


图2 某500 kV串补站电气接线图
Fig. 2 Electrical wiring diagram of a 500 kV series compensation station

图3为2021年7月第2次发生旁路的故障录波图,在系统故障发生于C相,其电容器电流达到1 844 A(基波有效值),不平衡电流达到6 A(基波有效值)。该串补的电容器电流保护定值为400 A,不平衡高定值为1.71 A,延时20 ms触发。故障时,电容器电流值及不平衡电流值均大于定值。根据电容器不平衡保护动作逻辑及电容器不平衡特性保护特性,此次故障满足电容器不平衡高定值保护动作逻辑,该保护动作正确。

本次电容器不平衡存在以下3种可能:故障电流穿越时冲击造成电容器异常或放电、故障电流穿越时对电流互感器产生电磁干扰、电流互感器光电转换模块故障。通过展开图3中不平衡电流、串补电容器及旁路开关高频电流波形录波图,在串补三相旁路后1.4 s后,如图4所示,C相串补电容器不平衡CT再次出现类似高频电流波形。此时,电容器不平衡采样通道有46 A的电流,电容器采样通道有183 A的电流,旁路开关通道有400 A的电流,电流值均含谐波分量。根据电流计算线路电流、电容器电流、旁路电流基本吻合基尔霍夫电流定律,因此可初步判断,此时出现有电容器放电电流。

因为第2次高频电流产生时已经没有外部电流冲击,可以基本排除故障电流穿越时对电流互感器产生电磁干扰的可能性;另外电流互感器光电转换模块故障造成采样问题波形一般为尖峰脉冲波形而不是类似这次的高频波形^[21]。

结合上述分析,可能性最大就是故障电流穿越时冲击造成电容器突然损坏或者电容器接头或内部放电导致不平衡电流的出现。

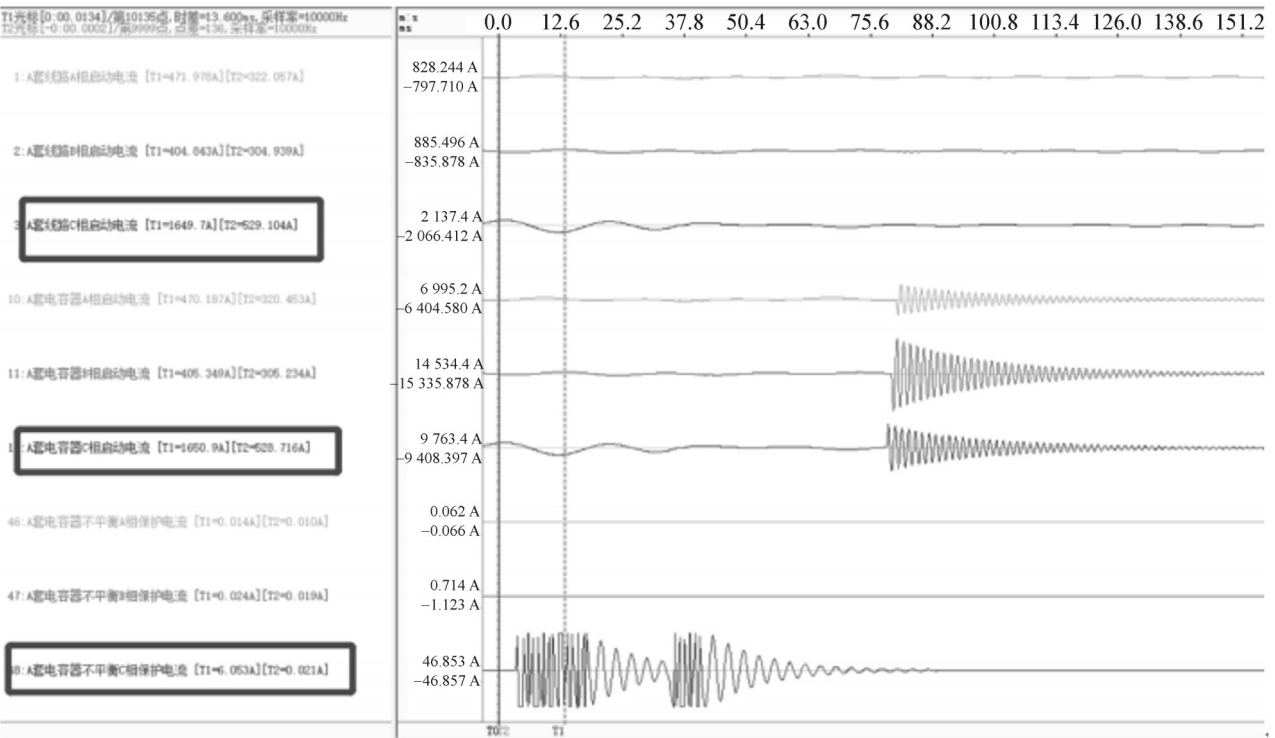


图3 串补保护故障录波图

Fig. 3 Series compensation protection fault record diagram

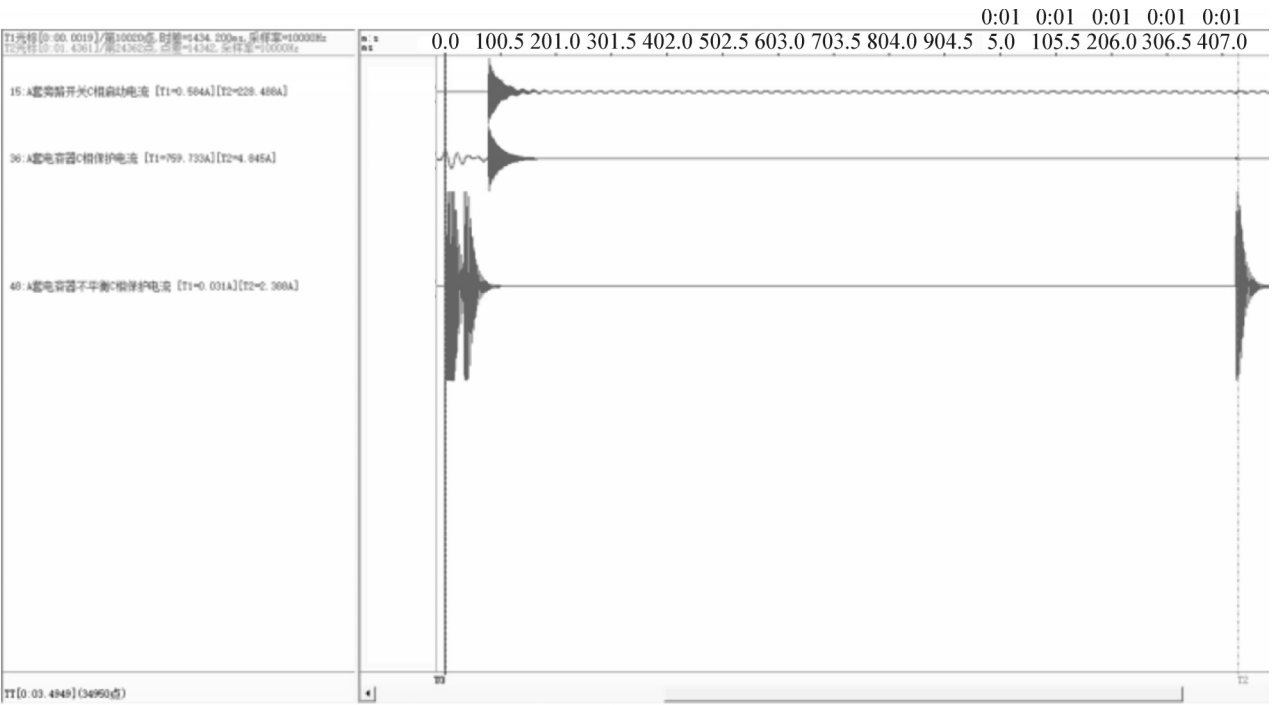


图4 C相串补电容器不平衡CT、串补电容器、旁路开关高频电流波形

Fig. 4 High frequency current waveform in unbalanced CT, series compensation capacitor, and bypass switch of phase-C

3 现场检查情况及故障分析

3.1 现场检查情况

根据常规检查要求,外观检查情况:电容器单元无渗漏油、膨胀情况,电容器本体及套管无放电、烧灼痕迹,电容器引线接头紧固良好、无松动。电

容器框架支撑绝缘子外观正常,无放电、烧灼痕迹。

试验情况:电容值测量与铭牌值对比,偏差均在 $\pm 2\%$ 以内,极对壳绝缘电阻正常均大于 $2\text{ G}\Omega$,满足Q/CSG 1206007-2017《电力设备检修试验规程》^[22]“电容值偏差超出额定值的 $\pm 3\%$ 范围”的要求,且平衡率满足要求,电容器桥臂测量值见表1。

表1 电容桥臂测量值 Table 1 Measurement value of capacitor bridge arm	
测试部位	桥臂电容值/ μF
C_1	110.02
C_2	110.26
C_3	109.83
C_4	109.96

通过上述试验检查说明此时设备并无异常,但该串补投运后仍出现不平衡高定值旁路,说明是电容器单元内部电容元件存在恢复性瞬时故障,仅在特定条件下故障方能显现,常规预防性试验等低电压检测手段无法确定故障点。

3.2 电容器单元结构

串补电容器采用油浸全膜电容器,电容器为内熔丝结构,每个电容器单元内部由多个电容元件串并联而成,每个电容元件都有相应的熔丝^[23-25],电容器单元内部有一放电电阻器。内部结构如图5所示。

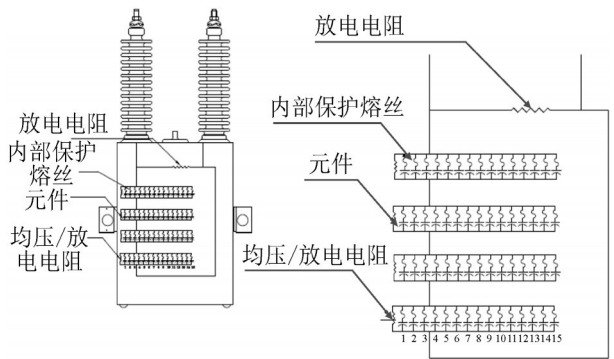


图5 电容器单元内部结构图
Fig. 5 Internal structure diagram of capacitor unit

每个电容器单元的额定电容约为为 40 μF ,每个电容器单元内部由 4 个电容心子串联,每个电容心子有 15 个电容元件串并联组成。

3.3 模拟故障仿真

搭建电容器单元内部故障原理图如图6所示,模拟第2节电容心子末端与低压端发生放电的情况,第3、4电容心子被旁路,原电容量取 40 μF ,故障后整体电容量变为 80 μF 。

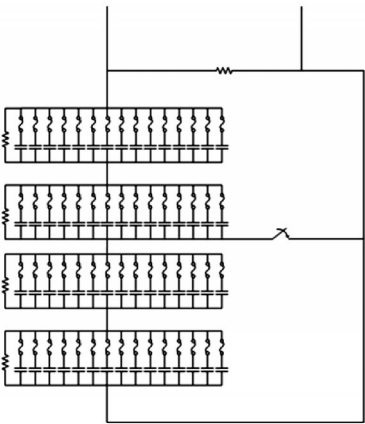


图6 电容器单元击穿模型
Fig. 6 Breakdown model of capacitor unit

搭建仿真电路如图7所示,模拟在低电压动作特性下不发生放电,不平衡电流几乎为0,当电压达到较高值时发生击穿,不平衡电流如图8所示,可见与故障录波图基本一致,排除电容器等外部故障情况下,仿真结果与不平衡电流故障录波图接近,结合运行人员在运行过程中听有闷响声,由此确定现场检查方案首要为查找电容器单元是否发生内部故障。

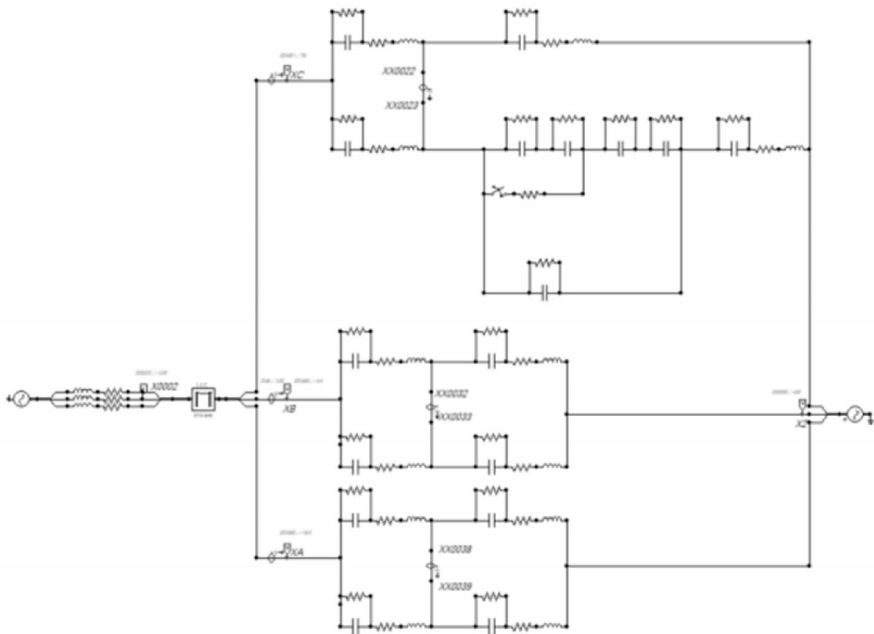


图7 串补电容器故障仿真电路
Fig. 7 Simulation circuit of series compensating capacitor fault

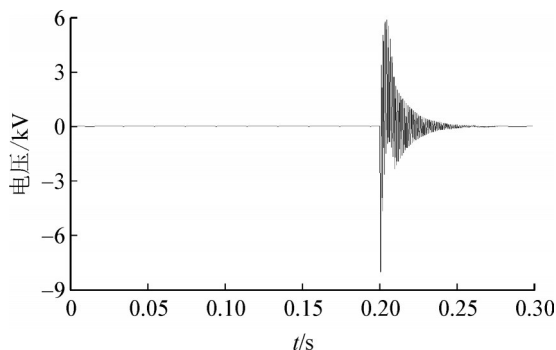


图8 不平衡电流仿真波形
Fig. 8 Imbalanced current simulation waveform

3.4 现场故障检测

通过故障分析与模拟验证,故障点可能发生于电容器单元内部,且为一种恢复性瞬时故障,即内部存在绝缘薄弱点,特性为在较低电压下未发生击穿,当电压达到一定值时才发生击穿。从电容器单元内部结构出发,现场采用电容器极间直流耐压试验检测,由于直流电压在电容器单元内部按放电电阻阻值分布,可以有效检验电容心子每个串联模块的绝缘状况。

现场对电容器单元两极施加 3~4 kV 直流电压,检查电容器内部有无放电现象,随后发现一台电容器在升至 1.2 kV 时无法继续升压,且内部发出放电声响,通过更换该只电容器,线路投运后未发生不平衡电流高定值动作情况。

4 故障单元解体分析

4.1 解体检查情况

返厂解体前再次测量电容值正常,极对壳绝缘正常。解体时放出电容器油,发现油的颜色已变黑,说明油中存在大量的碳化颗粒。电容心子低压引出导线绝缘皮明显破损,如图 9 所示,电容心子第 2、3 节串联模块高电位连接线处与低点位发生放电击穿,但由于并未搭接尚存在间隙,所以在低电压常规试验下测量电气参数并未发生改变,只在达到击穿电压时才有故障显现^[26-28]。

电容心子第 2、3 串联模块之间采用 2 根导线连接,连接点为线夹压接结构,线夹形状为矩形,安装后存在 2 个尖角。根据厂家报告说明,尖角处有明显放电痕迹,电容器运行时,元件极板边缘的电场较为集中,而在极板边缘有尖角的地方电场集中更为严重,这是发生局部放电的一个重要条件^[29-30]。该串补运行年限较长,故障电容器在长时间的运行过程中,该尖端位置持续发生局部放电,放电烧穿周围的绝缘纸板,进而烧坏电容心子低压电位引线的

绝缘皮,同时放电部位的铝箔朝周围扩散分布,与引线距离很近,当电容器电压升高时,铝箔(或 2、3 单元之间的引线)对电容心子低压引线放电。电容器退出运行后,放电部位仍为一个间隙,使用电容电感测试仪(最大输出电压 20 V)测量电容器电容值仍是正常。



图9 故障电容单元解体图
Fig. 9 Disassembly diagram of faulty capacitor unit

4.2 检测技术分析

该串补电容器故障的一个显著特征为:电容器内部发生放电,放电故障未波及到电容元件极间,也未完全破坏电容心子对外壳的绝缘。

目前,根据 Q/CSG 1206007-2017《电力设备检修试验规程》规定串补电容器的预防性试验项目中,无论是极对壳绝缘电阻试验项目还是电容器单元电容值测量项目,对于该种恢复性瞬时故障,仍无法有效检测。

串补电容器在运行过程中还有一个特征为:持续运行电压大都低于其额定电压。该电容器组的额定电流为 2 000 A,实际运行电流大多为 500 A 左右,故电容器的持续运行电压仅为其额定的 1/4 左右。若电容器内部存在绝缘薄弱点,在如此宽松的运行环境中是不易暴露出来的。

5 结语

本文针对一起 500 kV 串补变电站发生的 500 kV 串补电容器组不平衡电流高定值旁路故障进行了分析,本文认为,当发生该种故障后,在常规试验检查均无误的情况下,检查故障录波若电容器组不平衡电流是否为脉冲震荡波形,若与该文中不平衡电流波形接近应着重对电容器单元进行检查,在必要时可增加电容器单元极间直流电压试验进行检查。

由于直流耐压试验具有一定破坏性,不建议在日常预防性试验时采用。具体试验方法建议:串补

电容进行电容量测量,极对壳绝缘电阻测试等固定周期的试验合格后,再开展极间直流电压试验。根据 GB/T 6115.1-2008《电力系统用串联电容器 第1部分:总则》^[25]中 5.5 间端子间电压试验采用不低于 $4.3U_N$,其中 U_N 为该电容器单元额定电压,加压持续 10 s,观察电压、电流值是否保持稳定,有无明显压降及电流突变,有无闪络、击穿现象。通过该方法可有效查找出存在恢复性瞬时故障的电容器单元。

参考文献

- [1] 饶成成,罗李毅,徐健儿.一种适用输电线路智能巡检的人工智能图像识别方法[J]. 电器与能效管理技术,2022(10):38-43.
RAO Chengcheng, LUO Liyi, XU Jianer. An artificial intelligence image recognition method suitable for intelligent inspection of transmission line[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(10):38-43.
- [2] 刘羿辰,彭珑,王晨星,等.考虑电容电流的串补装置用 MOV 防爆性能研究[J]. 电瓷避雷器,2023(4):104-110.
LIU Yichen, PENG Long, WANG Chenxing, et al. Explosion suppression performance of MOV in series compensation system considering capacitance current[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4):104-110.
- [3] 张鑫宇,薛峰,李碧君,等.双馈风场串补系统次同步振荡紧急控制策略[J]. 电力工程技术,2023,42(5):108-116.
ZHANG Xinyu, XUE Feng, LI Bijun, et al. Emergency control strategy for subsynchronous oscillation of DFIG-based wind farms with a series-compensated line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023,42(5):108-116.
- [4] 马明,杜婉琳,白雪儿,等.配电网中串联补偿电容方案的谐波谐振分析[J]. 电测与仪表,2022,59(4):159-163.
MA Ming, DU Wanlin, BAI Xueer, et al. Harmonic resonance analysis of series compensation capacitor scheme in distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022,59(4):159-163.
- [5] 李颖,鲍一鸣,田雨,等.基于 VSG 的低压柔性直流系统连接串联补偿电网的稳定性分析[J]. 电网与清洁能源,2022,38(10):51-59.
LI Ying, BAO Yiming, TIAN Yu, et al. Stability analysis of VSG-based low voltage flexible DC system connected to series compensation grid[J]. Power System and Clean Energy, 2022,38(10):51-59.
- [6] 崔涛,曾宏,刘强,等.基于串联谐振试验装置的避雷器交流测试及应用[J]. 电瓷避雷器,2022(1):69-74.
CUI Tao, ZENG Hong, LIU Qiang, et al. Power-frequency test and application of moa based on series resonance test device[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1):69-74.
- [7] 田秋松,张健毅,刘涛,等.大型串联电容器组在特高压固定串补中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(3):33-39.
TIAN Qiusong, ZHANG Jianyi, LIU Tao, et al. Application of large-sized serial capacitor bank in UHV fixed series compensation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012,33(3):33-39.
- [8] 王平,何源森,邱宇峰,等.电力系统输电通道大容量静止无功补偿系统研究及其应用[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):10-18.
WANG Ping, HE Yuansen, QIU Yufeng, et al. Research and application of high capacity static var system for transmission path of electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(10):10-18.
- [9] 赵婉君.高压直流输电技术[J]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [10] 牛胜锁,梁志瑞,苏海峰,等.无功补偿电容器组参数在线辨识方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):123-128.
NIU Shengsuo, LIANG Zhirui, SU Haifeng, et al. Online parameter identification for reactive power compensation capacitor branch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(11):123-128.
- [11] 吴鹏.交流滤波器及并联电容器装置运行及维护[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [12] 朱敏,黄国燕,唐彬伟.风电场集电线路自动规划算法研究与应用[J]. 电器与能效管理技术,2020(11):29-34.
ZHU Min, HUANG Guoyan, TANG Binwei. Research and application of automatic planning algorithm for collecting lines of wind farms[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(11):29-34.
- [13] 黄宗超,王帆,刘一民,等.基于串补线性化模型的含串补线路距离保护整定方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):133-138.
HUANG Zongchao, WANG Fan, LIU Yimin, et al. Distance protection setting method of series-compensated line based on series compensation linearized model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(11):133-138.
- [14] 吴鹏,张源,史磊.换流站高压电容器组不平衡电流测量方法及装置研发[J]. 中国电力,2019,52(8):85-90.
WU Peng, ZHANG Yuan, SHI Lei. Research on method and device for measuring unbalanced current of high voltage capacitor bank in converter station[J]. Electric Power, 2019,52(8):85-90.
- [15] 郁惟镛,吴小建,高翔.阳城—淮阴 500 kV 串补电容线路对继电保护影响的研究[J]. 电力自动化设备. 1998(2):21-28.
- [16] 张杰,刘相枪,张耀山,等.桥差保护电容器组初始不平衡电流调整方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,

- 35(5):40-43.
ZHANG Jie, LIU Xiangqiang, ZHANG Yaoshan, et al. Research on adjustment method of initial unbalanced current of H type protection power capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5):40-43.
- [17] 谢宁. 串补电容器运行特性与故障分析[J]. 广西电业, 2014(1):116-120.
- [18] 田友元. 关于高压并联电容器的保护方式[J]. 电力电容器, 1993(4):1-7, 19.
- [19] 汪明. 并联电容器组的不平衡保护方式[J]. 硅谷, 2013, 6(21):57-58.
- [20] 李振, 庞素红. 高压并联电容器装置保护整定[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1):7-10.
LI Zhen, PANG Suhong. Protection setting on high voltage shunt capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1):7-10.
- [21] 周元清, 彭建春, 王官宏, 等. 特高压交流输电线路串联补偿合闸操作过电压研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1):23-26.
ZHOU Yuanqing, PENG Jianchun, WANG Guanhong, et al. Close-operation overvoltage of UHVAC transmission line with series compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1):23-26.
- [22] Q/CSG 1206007—2017. 电力设备检修试验规程[S]. 2017.
- [23] 蔡重凯, 陈晓宇, 金百荣, 等. 特高压串补电容器内熔丝试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(2):28-33.
CAI Chongkai, CHEN Xiaoyu, JIN Bairong, et al. Research on test of internal fuse for UHV series compensation capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(2):28-33.
- [24] 高和平, 刘水平. 电容器内熔丝应用中的若干问题分析与探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(5):6-12.
GAO Heping, LIU Shuiping. Various problem analysis and discussion on application of capacitor internal fuse[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(5):6-12.
- [25] 倪学锋, 刘瑞云, 林浩, 等. 关于无熔丝电容器和内熔丝电容器优劣的一点看法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(5):28-32.
NI Xuefeng, LIU Ruiyun, LIN Hao, et al. Opinion about merits and demerits of internally fused capacitor and fuseless capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(5):28-32.
- [26] 马鑫晟, 彭珑, 李怀玉, 等. 串补电容器元件击穿监测技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(4):59-63.
MA Xinsheng, PENG Long, LI Huaiyu, et al. Study on breakdown monitoring technique of series compensation capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(4):59-63.
- [27] 李俊杰, 马士莲. 特高压变电站 110 kV 并联电容器组电容器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(3):43-46.
LI Xiaojie, MA Shilian. Fault analysis of 110 kV shunt capacitor in UHV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(3):43-46.
- [28] 石琳, 米丰. 串补电容器故障原因分析与运检管理策略研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(9):118-121.
- [29] 金甲杰, 祁建怀, 刘虎城, 等. 电容器局部放电研究[J]. 装备制造, 2014(S2):54.
- [30] 耿建平, 方慧, 韦喆. 电力电容器局部放电的检测理论与技术探讨[J]. 电声技术, 2014, 38(10):25-29.
GENG Jianping, FANG Hui, WEI Zhe. Discussion and application status on the detection methods of partial discharge in power capacitor[J]. Audio Engineering, 2014, 38(10):25-29.

作者简介:

宋云祥(1992—), 男, 工程师, 从事高压电气设备试验及检修工作。E-mail:694267689@qq.com。

陈光(1988—), 男, 工程师, 从事高压电气设备试验及检修工作。E-mail:chengguang@im.ehv.csg。

罗赞琛(1979—), 男, 高级工程师, 从事高压电气设备试验及诊断工作。E-mail:luozanchen@im.ehv.csg。

曾星宏(1972—), 男, 高级工程师, 从事高压电气设备试验及诊断工作。E-mail:zengxinghong@im.ehv.csg。

杨政(1988—), 男, 工程师, 从事高压电气设备试验及诊断工作。E-mail:yangzheng@im.ehv.csg。