

特高压换流站交流滤波电容器组 不平衡保护定值整定研究

江金成¹, 彭寅章², 王尚德¹, 王鸿¹, 赵海鹏¹

(1. 国网新疆超高压分公司, 乌鲁木齐 830000;

2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830013)

摘要: 为了滤除直流输电系统交流侧产生的谐波, 同时补偿直流输电系统消耗的无功功率, 在直流输电系统运行过程中必须投入一定数量的交流滤波器, 交流滤波器的安全稳定运行, 对直流输电系统功率输送至关重要。本文通过交流滤波器在工程应用过程中, 因电容器元件故障不平衡保护动作跳闸的案例, 详细介绍了交流滤波器不平衡保护的检测、电流计算、保护原理, 分析了当前不平衡保护定值整定方法中, 存在单一电容器元件故障导致小组滤波器跳闸的问题, 并对该问题提出针对性解决办法, 避免单一元件引起的跳闸, 更符合交流滤波器设计原则, 有效提高交流滤波器运行的可靠性, 有力支撑直流输电系统功率输送, 对在运站的运维及新建站不平衡保护的整定有重要参考价值。

关键词: 直流输电系统; 交流滤波器; 无功补偿; 不平衡保护; 单一元件; 定值整定

Study on Unbalance Protection Setting of AC Filter Capacitor Bank in UHV Converter Station

JIANG Jincheng¹, PENG Yinzhong², WANG Shangde¹, WANG Hong¹, ZHAO Haipeng¹

(1. State Grid Xinjiang EHV Branch, Urumqi 830000, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830013, China)

Abstract: In order to filter out the harmonics generated at the AC side of the HVDC transmission system and, at the same time, compensate for the reactive power consumed by the HVDC transmission system, a certain number of AC filters must be put into operation during the operation of the HVDC transmission system, and safe and stable operation of the AC filters are crucial to the power transmission of the HVDC transmission system. In this paper, the detection of unbalanced protection, calculation of current and protection principle of the AC filters are described in detail through the the case of tripping of the unbalanced protection due to the fault of capacitor element in the engineering application of AC filters, the problem of tripping of group filters due to the fault of a single capacitor element in the setting method of current unbalance protection setting method is analyzed, the specific solution for the problem is proposed so to avoid tripping due to a single element, which is more in line with the design principles of AC filters and effectively improves operation reliability of AC filters. It strongly supports the power transmission of the HVDC transmission system, and has important reference value for the operation and maintenance of the operating station and the unbalanced protection setting of new station.

Keywords: DC transmission system; AC filter; reactive power compensation; imbalance protection; single element; setting of the fixed value

0 引言

高压直流换流器在运行中会消耗无功功率, 不同的运行方式, 如不同的直流功率水平和触发角

等, 所消耗的无功功率不同, 通常换流站所消耗的无功功率为额定输送功率的 40%~60%左右^[1-3]。在直流输电系统中, 为了滤除直流系统交流侧产生的谐波, 同时补偿系统消耗的无功功率, 在直流系统

运行过程中必须投入一定数量的交流滤波器,以满足直流系统运行的条件,交流滤波器的安全稳定运行直接关系直流系统的稳定运行,反之甚至会造成直流系统功率回降甚至闭锁等严重后果^[4]。

工程应用中,交流滤波器的跳闸通常是因为一次元器件在运行过程的损坏,比如电容器击穿等。文献[5-23]介绍了不同地区、不同换流站交流滤波器运行存在的问题及不平衡跳闸案例,总结了若干运行维护建议,但在故障定位排查方面缺少相关方法。文献[24]提出了一种单H桥的故障定位方法,解决了故障元器件定位难等难题,但是该方法需额外增加两台电流互感器,造成了在运工程的改造困难和成本增加。本文基于典型的交流滤波器电容器击穿导致不平衡保护动作的案例,详细阐述了不平衡保护的采样、逻辑计算、保护原理及存在问题,分析当前不平衡保护定值整定方法中存在的不足,并对该问题提出针对性解决办法,可有效提高交流滤波器运行的可靠性,避免单一元件引起的跳闸,对在运站的运维及新建站不平衡保护的整定有重

要参考价值。

1 换流站交流滤波器及无功控制简介

换流站无功补偿与控制是在考虑交流系统容性及感性无功提供能量的基础上,进行换流站的无功平衡,确定两端换流站的无功补偿总容量、分组容量及组数。换流站无功补偿装置可分组投切运行,以适应直流各种运行方式。通常常规直流特高压直流换流站无功补偿装置分为4大组,每个大组配置4小组或5小组交流滤波器,大组均接入交流场3/2接线出线间隔,提高可靠性。配置类型为:BP 11/13 交流滤波器、HP 24/36 交流滤波器、HP 3 交流滤波器、并联电容器。

无功功率控制(reactive power control, RPC),是集成在直流控制系统内的一个功能。RPC通过投/切交流滤波器、并联电容组,控制与交流系统的无功功率量、交流母线电压,并滤除交流系统谐波。

RPC中的不同功能具有不同的优先级,典型配置如表1所示。

表1 RPC典型功能配置
Table 1 Typical function configuration of RPC

序号	名称	功能
1	Over voltage control(交流过电压控制)	根据交流滤波器母线过电压切除滤波器
2	Abs min filter(绝对最小滤波器)	根据设备的额定值投入滤波器
3	U_Maximum/U_Minimum(交流母线电压限制)	监视稳态交流母线电压
4	Q_Maximum(最大无功限制)	限制投入的滤波器数量
5	Min filter(最小滤波器)	投入滤波器以满足谐波滤波要求
6	Q_control/U_control(无功控制/电压控制)	将与交流系统的无功功率交换/交流母线电压控制在参考值

整流侧与逆变侧的换流站根据既定的无功控制策略,结合系统提供/吸收的无功能力,按无功交换限制以及滤波性能要求控制交流滤波器、并联电容器以及低压电抗器等无功补偿装置的投切操作,并结合电力系统运行方式、直流系统无功电压控制策略要求、控制系统设计等进行合理优化。

2 交流滤波器电容器结构

特高压换流站交流滤波器电容器单元安装在框架中,框架对地用支柱绝缘子支撑,以满足绝缘的要求,电容器单元一般配置内熔丝保护,内置放电电阻。电容器单元结构见图1。

电容器装置主要由电容器组及其配套件组成,每相电容器组按H形电路布置,即:按总数分为容量相同的两个并联部分,两部分之间采用不平衡电流保护,装置从两部分电容器串联段中间引出两个接线端子,供外接继电保护电流互感器用,保证电流互感器接在H形电路的中部。使得H形电路中的4个桥臂的

电容器单元平衡,H形电路中的电流保持为零。

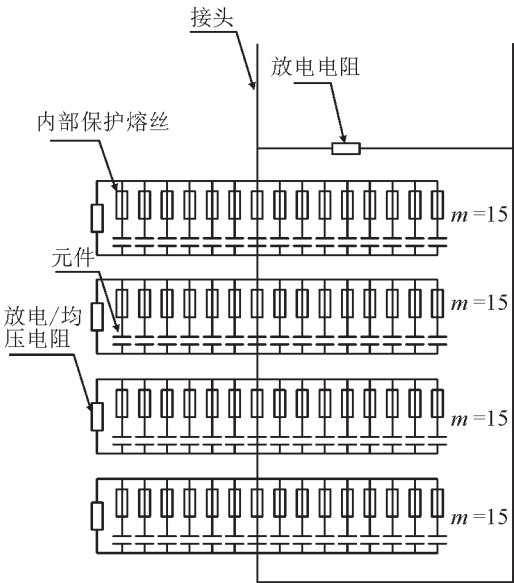


图1 电容器单元结构示意图
Fig. 1 Structural schematic diagram of capacitor element

3 交流滤波器不平衡保护

交流滤波器中的高压电容器故障时,通常故障电流较小,而传统保护无法检测,不平衡保护对电容元件故障引起的微小电流变化较为敏感,从而可以避免高压电容单元出现雪崩效应。

3.1 不平衡保护检测

典型电容桥示意图见图2。电容器故障检测采用的是基波不平衡电流检测方法。正常运行时,相对应桥臂的容抗相同(桥臂1与桥臂2对应,桥臂3与桥臂4对应),流过 T_1 的不平衡电流值为0;当某一个桥臂出现故障时,故障桥臂的容抗值发生变化,使得对应桥臂不再平衡,将会有一定大小的不平衡电流从 T_1 流过。故障桥臂的容抗变化越大,不平衡电流就越大。

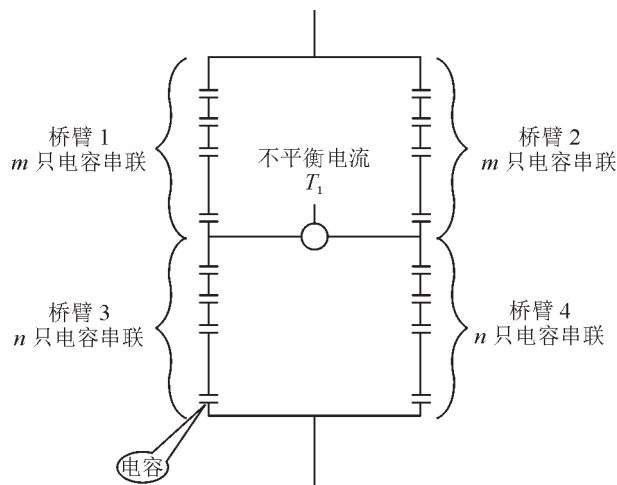


图2 常见电容桥示意图

Fig. 2 Schematic diagram of common capacitance bridge

3.2 不平衡电流计算

以BP 11/13型交流滤波器为例,工程中常用主接线如图3所示。对电容器组桥式接线电路进行简化,如图4所示。

简化电路中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为各桥臂电容值。由简化电路可知

$$I_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} I \quad (1)$$

$$I_3 = \frac{C_3}{C_3 + C_4} I \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{C_1 C_4 - C_2 C_3}{(C_1 + C_2)(C_3 + C_4)} I \quad (3)$$

式中: I 为电容器组额定电流; I_0 为不平衡电流。由式中可以看出来,需要尽量保证 $I_1 = I_2$, $I_3 = I_4$,使不平衡度尽量小,从而使电容器组满足稳定运行的要求。

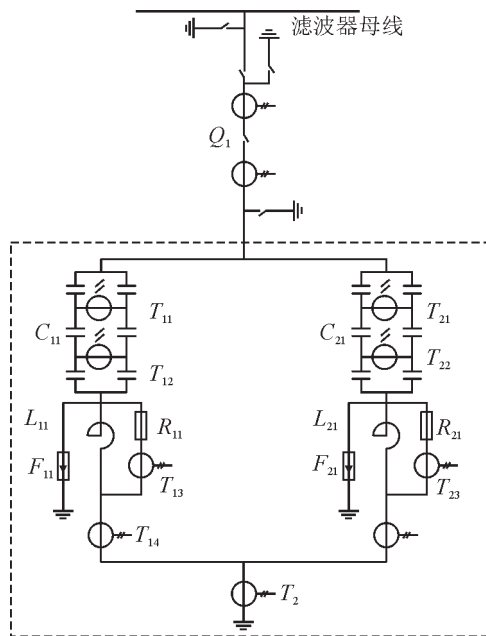


图3 BP 11/13型交流滤波器常用主接线示意图

Fig. 3 Common primary wiring schematic diagram of BP 11/13 AC filter

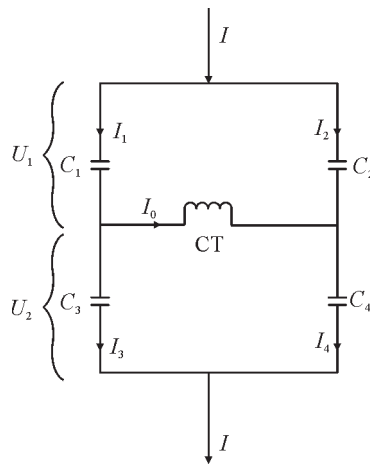


图4 电容器组桥式电路简化图

Fig. 4 Simplified diagram of bridge circuit of capacitor bank

3.3 不平衡保护原理

在交流滤波器的实际运行中,安装阶段应进行电容器容值配平,确保 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 之间的误差最小。交流滤波器带电后,在投入不平衡保护前应对装置中的不平衡补偿参数进行一次初始化,确保不平衡电流最小。

不平衡保护分为稳态不平衡保护、暂态不平衡保护。稳态不平衡保护动作方程为

$$I_{ub} > I_{ubqd} \quad (4)$$

$$\frac{I_{ub}}{I_{tro}} > K_{ubzd} \quad (5)$$

式中: I_{ub} 为交流滤波器的不平衡电流(有效值); I_{tro}

为交流滤波器的穿越电流; I_{ubqd} 为不平衡启动整定值,已固化在装置中,不需整定; K_{ubzd} 为不平衡系数保护定值。

暂态不平衡保护的动作方程为

$$\Delta I_{ub} > \Delta I_{ubqd}$$

(6)

$$\frac{\Delta I_{ub}}{I_{tro}} > \Delta K_{ubzd}$$

(7)

式中: ΔI_{ub} 为交流滤波器的暂态不平衡电流(有效值); I_{tro} 为交流滤波器的穿越电流; ΔI_{ubqd} 为暂态不

平衡起动值,它由装置内部设定,无需整定; ΔK_{ubzd} 为暂态不平衡保护定值。

当任一相满足以上条件时,稳态或暂态不平衡元件动作。稳态及暂态不平衡保护各包括 1 段报警和 1 段动作。

4 不平衡保护定值整定

4.1 常规定值整定方法

以 BP 11/13 为例说明不平衡保护定值整定,其电容器组基本参数见表 2。

表 2 BP 11/13 电容器组基本参数
Table 2 Basic parameters of BP 11/13 capacitor bank

交流滤波电容器组	数值	
	BP 11	BP 13
额定端电压/kV	672.4	650.7
额定电容量/ μ F	0.801 5	0.803 4
装置接线(双 H 形)	2 并 22 串	2 并 22 串
	2 并 27 串	2 并 27 串
	2 并 21 串	2 并 21 串
	2 并 18 串	2 并 18 串
电容器额定容量/kvar	647	608
电容器额定电压/V	7 640	7 395
电容器额定电容/ μ F	35.266	35.35
电容器内部构成	4 串 15 并	4 串 15 并
内熔丝型号	CCP843Y6024	CCP843Y6024

电容器组主接线见图 5,电容器单元内单元元件损坏时,电容值会出现异常,导致桥臂不平衡,出现不平衡电流。在定值整定过程中可以参照不平衡电流计算公式进行不平衡电流计算,本文以 BP 13 参数为基础,利用 Ni Multisim 建立仿真,模拟各种故障工况下不平衡电流。建立仿真模型,假设每只电容器及每个单元元件容量相等,电容器单元额定电容量为 C ,则每串容量为 $4C$,元件的容量为 $4C/15$ 。

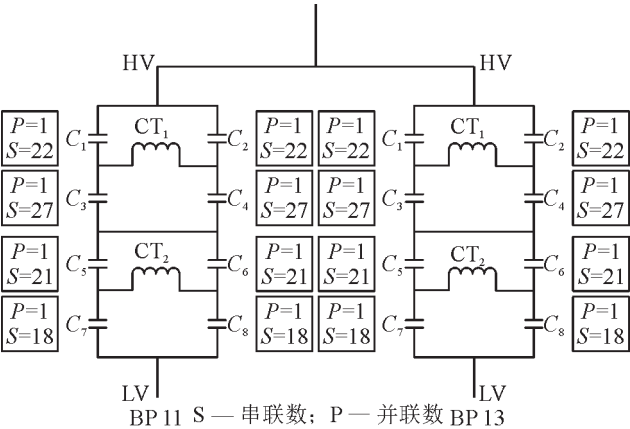


图 5 BP 11/13 电容器组主接线图
Fig. 5 Primary wiring diagram of BP 11/13 capacitor bank

若发生元件击穿,熔丝熔断,如图 6 所示。则每串的容量变为 $56C/15$,电容器单元容量变为 $1/(3/4C+15/56C)$,桥臂电容量为 $3/4C+15/56C+21/C$ 。

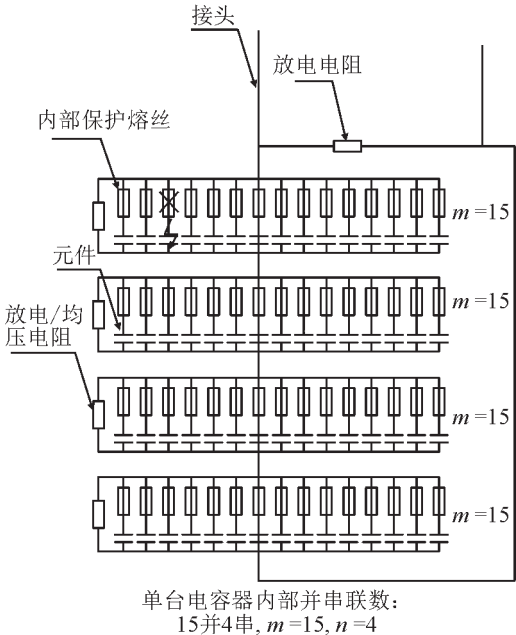


图 6 BP 13 电容器单元单元元件击穿示意图(熔丝熔断)
Fig. 6 Single element breakdown schematic diagram of BP 13 capacitor element (fuse is fused)

代入 BP 13 分支电容器额定容量 35.35 μF , 可计算出, 电容器单元元件击穿时, 不平衡电流为 43.6 mA。考虑故障发生在同一串的最恶劣工况, 以此类推, 仿真计算出若干个元件损坏对应的不平衡电流值, 并通过元件、电容器单元前后电位探针, 计算对应元件、电容器过电压倍数, 计算结果见表 3。

根据 GB/T 11024.4 的定义, 内熔丝设计用于隔

离故障电容器元件, 从而允许该电容器单元的其余完好部分继续运行。当完好电容器上过电压过高时, 不平衡保护发出告警或断开整组电容器组。根据工程技术规范, 不平衡保护设置了三段式保护: 元件过电压倍数达到约 1.4 倍时, 报警; 1.7 倍时, 报警和延时 2 h 跳闸; 大于 1.9 倍小于 2.0 倍时, 立即跳闸。根据上述仿真结果, 结合产品过电压耐受水平, 设定电流定值整定值见表 4。

表3 BP13不平衡电流计算结果表
Table 3 Calculation result of unbalance current of BP 13

BP 13 电容器组(上段, CT ₁)						
f	e	V_{cu}	γ	I_g	I_n	I_g/I_n
故障电容 元件数	元件过电压 倍数/%	故障电容单元 过电压倍数/%	故障臂与完好臂间 电容之比	H 不平衡电 流值/mA	额定 电流值/A	不平衡 度/%
0	100.00	100.00	1	0	215.4	0.000 0
1	107.10	101.70	0.999	43.7	215.4	0.020 3
2	115.30	103.70	0.998	94.1	215.4	0.043 7
3	124.80	106.10	0.997	152.8	215.4	0.070 9
4	136.00	108.80	0.996	222.1	215.4	0.103 1
5	149.40	112.10	0.994	305.1	215.4	0.141 6
6	165.90	116.10	0.992	406.5	215.4	0.188 7
7	186.30	121.10	0.990	532.8	215.4	0.247 4
8	212.50	127.50	0.987	694.9	215.4	0.322 6
9	247.30	136.10	0.983	910.2	215.4	0.422 6
10	295.70	147.90	0.978	1 210.2	215.4	0.561 8

表4 BP 13不平衡电流定值整定表
Table 4 Setting of unbalance current of BP 13

BP 13 电容器组(上段, CT ₁)					
保护段	元件过电压 倍数	故障电容 元件数	故障电容单元 过电压倍数	一次不平衡 电流值/mA	$(I_g/I_n)/\%$
初始不平衡	1	0	1	45	0.020 3
报警	1.36	4	1.09	181	0.103 1
报警和延时 2 h 跳闸	1.66	6	1.16	331	0.188 7
立即跳闸	<2.2	<8	<1.35	532	0.247 4

4.2 定值整定存在问题

在常规定值整定中, 单元件故障时均认为电容器内熔丝熔断, 内熔丝动作主要取决于下述两个因素或之一: 1) 与故障元件相并联的完好元件对故障元件及其内熔丝的放电能量; 2) 工频故障电流。

在成套设计中, 由于电容器的运行电压设计要考虑故障时熔丝可靠熔断, 并兼顾交流电网暂态故障电压穿越能力, 容易出现电容器组母线实际运行电压较设计值低的情况, 故障时完好元件对故障元件及相串联的熔丝放电的能量会较小, 熔丝动作的可靠性会下降。假设保护动作时电容器元件电容丝并未熔断, 相当于某一串电容元件被短路, 示意

图如图 7 所示。

对上述工况进行仿真, 将被断开的短路电容元件用一根导线代替。通过仿真可以看出, 当单元件故障时, 若熔丝未熔断, 该串段电容器被短路, 将产生较大不平衡电流。以 BP13 为例, 假如第 2 串电容器中有一个元件短路, 但熔丝未熔断, 不平衡电流达 615 mA, 若根据表 3 仿真计算结果, 该不平衡电流大小与考虑熔丝情况下损坏 7 个元件产生的不平衡电流相当, 对应的电容器元件过电压倍数已超过正常水平的 1.86 倍。计算不平衡度 $I_g/I_n=0.286\ 0\%$ 。调度定值单中以不平衡度为整定门槛, 并考虑一定裕度, 定值单如表 5 所示。

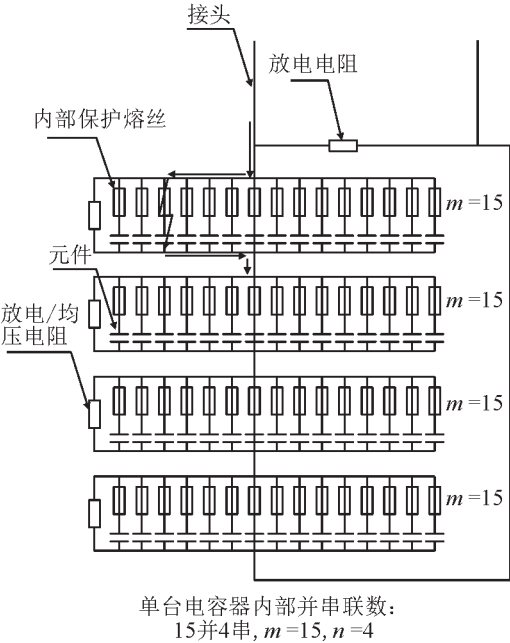


图7 BP 13电容器单元单元件击穿示意图(熔丝未断)
Fig. 7 Single element breakdown schematic diagram of BP 13 capacitor (fuse is not not fused)

表5 BP 13不平衡保护定值单
Table 5 Unbalance protection setting list of BP 13

定值项	定值
2分支C _i 不平衡ⅠⅠ段比例系数/%	0.084 0
2分支C _i 不平衡ⅠⅡ段时间/s	10
2分支C _i 不平衡ⅠⅡ段比例系数/%	0.153 8
2分支C _i 不平衡ⅠⅡ段时间/min	120
2分支C _i 不平衡ⅠⅢ段比例系数/%	0.201 7
2分支C _i 不平衡ⅠⅢ段时间/s	0.02

注:表中为BP 13高压塔。

根据调度定值单,单元件故障熔丝未熔断时的计算不平衡度已达到保护Ⅲ段动作定值,按当

表6 BP 13定值优化表(熔丝未断)
Table 6 Optimization table of BP 13 setting (fuse is not fused)

昌吉换流站BP 13电容器组(上段,CT ₁)					
保护段	元件过电压倍数	故障电容元件数	故障电容单元过电压倍数	一次不平衡电流值/mA	(I _g /I _n)/%
初始不平衡	1	0	1	45	0.020 3
报警	1.36	4	1.09	181	0.103 1
报警和延时2 h跳闸	1.66	6	1.16	331	0.188 7
立即跳闸	<2.2	<8	<1.35	650	0.247 4

6 结语

交流滤波器的稳定运行关系到直流输电的安全稳定运行,成套设计阶段需考虑较多复杂工况,特别是暂态故障穿越能力,在设计制造时需考虑较高的过电压倍数,可能导致电容器单元件故障时隔离范围扩大。本文对交流滤波器故障隔离存在的

前定值,延时 20 ms 不平衡保护将动作。然而,根据仿真计算结果可以看出,此故障工况下,其他正常电容器元件的过电压倍数实际仅为 1.007 倍,远未到设备运行限值,此时熔丝未熔断,电容器长期运行不会带来其他影响,若运行过程中熔丝断裂,由表 3 可知,不平衡电流将进一步减小,其他正常电容器元件的过电压倍数仍在允许范围之内,可以正常运行。

针对上文所述,当前换流站交流滤波器不平衡保护定值以不平衡度作为定值项,以此来表征电容器元件故障情况下正常元件的过电压倍数,基于条件是电容器元件故障时,故障元件的熔丝可以快速熔断。该方式在特殊工况下存在不平衡度与元件实际过电压倍数不相符的问题,即当电容器的额定电压设计高于现场实际电压水平,电容器单元件故障时,其熔丝在短时间内不能可靠熔断,造成保护误判,当前故障工况下,正常元件过电压倍数已达到保护快速段动作定值而跳闸,造成单元件立即跳闸,严重影响设备运行可靠性。

5 定值整定优化方法

针对 4.2 节所述工况,为了确保内熔丝能在继电保护启动前可靠熔断,提高电容器组的投运率,充分考虑电容器元件可承受电压水平,在整定不平衡电流保护第Ⅲ段保护定值时,应考虑使其可靠躲过单元件故障熔丝未熔断产生的不平衡电流。以BP 13 为例,定值优化见表 6。将快速段不平衡电流值改为 650 mA,躲过单元件故障熔丝未熔断产生的不平衡电流 615 mA。

定值问题进行详细分析,基于仿真计算提出了定值整定优化方案,可以避免单一电容器元件故障导致小组滤波器跳闸的问题,有效提高交流滤波器运行的可靠性,对在运站的运维及新建站不平衡保护的整定有重要指导意义。

参考文献

[1] 吕文韬,谢海葳,徐群伟,等. 特高压直流换流站交流滤波器组对电网谐波的影响分析[J]. 电力系统自动化,2019,

- 43(23):217-225.
- LYU Wentao, XIE Haiwei, XU Qunwei, et al. Analysis on impact of AC filter sets on power grid harmonic in UHVDC converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 217-225.
- [2] 张强, 梁迪团, 刘宁. ± 800 kV 普洱换流站无功配置的研究分析[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 117-121.
- ZHANG Qiang, LIANG Ditian, LIU Ning. Reactive power compensation scheme and configuration for ± 800 kV Pu'er converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 117-121.
- [3] 邓艳平, 杨秀, 张美霞, 等. ± 800 kV 向上直流换流站交流滤波器的配置与控制[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 8-13.
- DENG Yanping, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Configuration and control of AC filter for converter station of Xiangjiaba-Shanghai ± 800 kV DC power transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 8-13.
- [4] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [5] 赵彦军. HVDC 用电容器组对地绝缘子 50% 闪络问题研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(5): 1-7.
- ZHAO Yanjun. Study on 50% flashover voltage of ground insulator of capacitor bank for HVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 1-7.
- [6] 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.
- [7] 甘鹏, 王林, 杨健, 等. 兴安直流兴仁换流站交流滤波器运行分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 66-69.
- GAN Peng, WANG Lin, YANG Jian, et al. Operation analysis on AC-filter in xingan HVDC project xingren converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3): 66-69.
- [8] 郭树永, 杨洁民, 蒙健明. 一起交流滤波器不平衡保护跳闸事故分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(1): 63-68.
- GUO Shuyong, YANG Jiemin, MENG Jianming. Analysis on an accident of the AC filter trip due to unbalance protection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(1): 63-68.
- [9] 朱韬析, 王宁宁, 郭卫明, 等. 交流滤波器电容器不平衡保护在南方电网直流输电系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 102-105.
- ZHU Taoxi, WANG Ningning, GUO Weiming, et al. The application of the unbalance current protection for capacitor of AC filter used in the HVDC system of CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 102-105.
- [10] 梁天明, 李豹, 张蔷, 等. 交流滤波器电容器运行情况分析及共性问题探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(6): 77-82.
- LIANG Tianming, LI Bao, ZHANG Qiang, et al. Operation analysis and discussion of general common problems of AC filter capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(6): 77-82.
- [11] 窦如婷, 李豹. 换流站交流滤波器 C_1 电容器不平衡保护定值研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(6): 19-23.
- DOU Ruting, LI Bao. Study on imbalance protection setting of capacitor C_1 in AC filter at converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(6): 19-23.
- [12] 张照辉, 徐江涛, 刘子全, 等. 一起特高压换流站交流滤波电容器故障分析与思考[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 47-52.
- ZHANG Zhaohui, XU Jiangtao, LIU Ziquan, et al. Fault analysis and consideration on AC filter capacitor at UHV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 47-52.
- [13] 杨明, 赵森林, 李海英, 等. 高压直流输电用交流滤波电容器组的设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(5): 1-6.
- YANG Ming, ZHAO Senlin, LI Haiying, et al. Design of AC filter capacitor bank for HVDC transmission system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(5): 1-6.
- [14] 刘晓琳, 曹泽宇, 高丙团, 等. HVDC 送端交流系统故障暂态过电压评估指标[J]. 电力建设, 2023, 44(1): 64-72.
- LIU Xiaolin, CAO Zeyu, GAO Bingtuan, et al. Evaluation index of transient overvoltage during fault at HVDC sending-end AC system[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 64-72.
- [15] 吴嘉琪, 陈飞, 谭静, 等. 宜都换流站直流滤波器电容器 C_1 不平衡保护频繁告警原因分析及解决措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6): 8-14.
- WU Jiaqi, CHEN Fei, TAN Jing, et al. Cause analysis and solutions for frequent alarms of unbalanced protection of DC filter capacitor C_1 in Yidu converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 8-14.
- [16] 疏奇奇. 某变电站无功补偿电容器故障分析及解决方案[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(6): 47-49.
- SHU Qiqi. Fault analysis and solutions of reactive power compensation capacitor at a substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(6): 47-49.
- [17] 王贺萍, 王刚, 宋华, 等. 并联电容补偿工程参数计算与

- 分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(2): 9-12.
- WANG Heping, WANG Gang, SONG Hua, et al. Calculation and analysis of engineering parameters for the shunt capacitor compensation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(2): 9-12.
- [18] 梁琮. 并联电容器组不平衡保护初始值的估算[J]. 电力电容器, 2002(3): 1-4.
- LIANG Cong. Estimating the initial value of the unbalance protection for shunt capacitor bank[J]. Power Capacitor, 2002(3): 1-4.
- [19] 周宗金. 谈电力电容器无功补偿及其安全应用[J]. 科技与企业, 2013(22): 367-367.
- [20] 武家辉, 王维庆, 王海云, 等. 哈郑特高压直流送端电网静态电压薄弱点研究与无功补偿[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 134-139.
- WU Jiahui, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on the weak point of static voltage of transmission end in hazheng UHVDC transmission system and reactive power compensation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 134-139.
- [21] 潘志文, 崔桂梅. 电力电容器的电容值测量及失效分析[J]. 物理测试, 2011(6): 59-62.
- PAN Zhiwen, CUI Guimei. Measurement of capacitor value and failure analysis of power capacitors[J]. Physics Examination and Testing, 2011(6): 59-62.
- [22] 刘天祥, 姚孟, 吕拦坡. 高压电力电容器不平衡故障处理方法及其优化[J]. 中文科技期刊数据库(全文版), 2017(1): 177-178.
- LIU Tianxiang, YAO Meng, LYU Lanpo. Processing method and optimization of high voltage power capacitor unbalance fault[J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full Text) Engineering Technology, 2017(1): 177-178.
- [23] 余江, 周红阳, 赵曼勇. 高压电容器不平衡保护的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 85-89.
- YU Jiang, ZHOU Hongyang, ZHAO Manyong. Related problems of unbalance protection for high voltage capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 85-89.
- [24] 雷鸣东, 张世洪, 许可, 等. 基于相对电流检测的桥差不平衡保护电容器组故障定位方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 1-5.
- LEI Mingdong, ZHANG Shihong, XU Ke, et al. Study on fault location method of bridge differential unbalanced protection capacitor bank based on relative current detection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 1-5.

作者简介:

江金成(1989—), 男, 工程师, 主要从事特高压直流控制与保护技术工作。E-mail: 1195573731@qq.com。

彭寅章(1992—), 男, 工程师, 主要从事特高压直流控制与保护技术工作。

王尚德(1992—), 男, 工程师, 主要从事特高压换流站二次设备检修工作。

王鸿(1987—), 男, 工程师, 主要从事特高压直流控制与保护技术工作。

赵海鹏(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事特高压直流控制与保护技术工作。

(上接第89页)

- [22] ALI TAYYEBI, DOMINIC GROSS, ADOLFO ANTA, et al. Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9133-9144.
- [23] CHEN Meng, ZHOU Dao, FREDE BLAABJERG, Enhanced transient angle stability control of grid-forming converter based on virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9133-9144.
- [24] YU Yunjun, HU Xiang. Active disturbance rejection control strategy for grid-connected photovoltaic inverter based on virtual synchronous generator[J]. IEEE Access, 2019(7): 17328-17336.
- [25] QI Guoyuan, XIA Li, CHEN Zengqiang. Problems of extended state observer and proposal of compensation function observer for unknown model and application in UAV[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(5): 2899-2910.
- [26] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]// Proceedings of 2003 American Control Conference. St Louis, USA: IEEE Press, 2003: 4989-4996.

作者简介:

周中浩(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为重复控制和主动干扰抑制控制。

魏春(1987—), 男, 副教授, 研究方向为新能源发电控制技术。E-mail: chunwei18@zjut.edu.cn。

陈强(1984—), 男, 教授, 研究方向为机电伺服系统自适应与学习控制。

尹天琦(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步风力发电系统抗干扰控制。