

±800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡 电流及过电压分析

刘磊¹, 李小鹏¹, 张纯¹, 黄宇², 张曾², 张华杰¹, 曾雪洋¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610041)

摘要:滤波器的高压电容器是特高压直流输电系统中故障率相对较高的设备,通常配置不平衡保护来反映其内部的故障情况。为进一步明确高压电容器内部故障工况与不平衡电流、过电压等外部故障表现的量化关系,为实际工程不平衡保护的配置与优化提供理论支撑,文中以±800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器为研究对象,考虑高压电容器内部部分电容单元断开、电容单元内部部分电容元件断开两类典型故障,分析推导了不平衡电流与故障单元/元件个数的对应关系,并给出了电容单元故障后高压电容器不同位置的过电压表达式。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了理论推导的正确性,明确了可以导致现有三段不平衡保护动作的具体故障工况。

关键词:直流输电; 直流滤波器; 不平衡电流; 过电压

中图分类号: TM 732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)02-0059-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230210

Analysis of Unbalance Current and Overvoltage of BP13 High-voltage Capacitor in ±800 kV Yalongjiang Converter Station

LIU Lei¹, LI Xiaopeng¹, ZHANG Chun¹, HUANG Yu², ZHANG Zeng², ZHANG Huajie¹, ZENG Xueyang¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power UHVDC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: High-voltage capacitor of filter is a device with relatively high failure rate in UHVDC transmission system, and it is usually equipped with unbalance protection to reflect its internal fault. In order to further clarify the quantitative relationship between internal fault conditions and external fault performance such as unbalanced current and overvoltage, and provide theoretical support for the configuration and optimization of unbalanced protection in practical engineering, BP13 high-voltage capacitor of ±800 kV Yalongjiang converter station is taken as the research object. Considering two typical faults, the partial capacitor unit disconnection and the partial capacitor element disconnection in capacitor unit, the corresponding relationship between the unbalance current and the number of faulty units/components is analyzed and derived, and the expressions of overvoltage at different positions of high-voltage capacitor after the capacitor unit fault are given. Based on PSCAD/EMTDC simulation platform, the correctness of theoretical derivation is verified. Finally, the specific fault conditions that can lead to the existing three-section unbalanced protection action are identified.

Key words: HVDC transmission; DC filter; unbalanced current; overvoltage

0 引言

交/直流滤波器是特高压直流输电工程的关键

设备,起到了滤除谐波、补偿无功功率等作用^[1]。在滤波器结构中,高压电容器是最重要的组成部分,它不仅承担着交流母线的工频压降或者直流线路的直流压降,还承担大部分的谐波压降。实际运行经验表明,高压电容器属于较易损坏的设备,且一旦其内部有电容元件故障,容易导致相邻元件过电压,进

而引发雪崩效应,威胁直流输电系统运行安全^[2-4]。

现有工程的高压电容器通常采用 H 型接线,通过电容器不平衡保护来检测内部元件故障^[5-7]。然而,不平衡保护的定值选取原则相对单一,多依赖设备厂家给定。为实现可根据实际情况对不平衡保护定值进行灵活配置或优化,需要首先掌握高压电容器各类内部故障工况与不平衡电流、电容过电压等的精确对应关系。下面以 ± 800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器为对象,详细分析推导了高压电容器内部部分电容单元断开、电容单元内部部分电容元件断开下的不平衡电流表达式;研究了电容单元故障后高压电容器不同位置的过电压情况;最后,仿真验证了理论推导的正确性,并明确了不平衡保护三段定值分别对应的故障条件。研究结论有望为后续实际工程高压电容器故障分析、保护定值优化等提供理论支撑和技术参考。

1 高压电容器结构及不平衡保护

1.1 高压电容器结构

高压电容器是 BP13 交流滤波器的重要组成部分,其结构如图 1 所示。为便于检测内部电容故障,高压电容器整体通常采用 H 型接线结构,包含 4 个桥臂,每个桥臂由多个电容单元串并联构成。在每个电容单元中,又包含多个电容元件组成串并联结构。电容元件串联的内熔丝可在元件被击穿时熔断该支路,实现对元件的保护,此外利用与电容元件并联的均压电阻可避免局部电压过高。

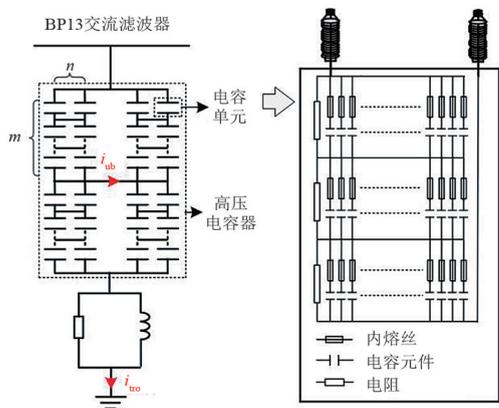


图 1 BP13 交流滤波器高压电容器结构

1.2 不平衡保护

系统正常运行条件下,高压电容器整体结构对称,H 桥中点无电流流过;而当某桥臂上有电容损坏

时,高压电容器结构不再对称,H 桥中点流过不平衡电流,且不平衡电流随着故障严重程度的增大而增大。根据此原理,现有直流工程的滤波器通常配置有高压电容器不平衡保护。将不平衡电流记为 i_{ub} ,流过滤器整体的穿越电流记为 i_{tro} ,稳态不平衡保护动作方程为:

$$i_{ub} > i_{ubqd} \quad (1)$$

$$\frac{i_{ub}}{i_{tro}} > k_{ubzd} \quad (2)$$

式中: i_{ubqd} 为不平衡启动定值; k_{ubzd} 为不平衡比例系数定值。式(1)为启动方程,条件满足时保护逻辑判断经过一个展宽后若不平衡电流依然大于启动定值,则满足启动条件,启动后开放出口正电源,同时开放保护板中的不平衡保护元件;式(2)为动作方程,当任一相满足启动条件且满足动作方程时,稳态不平衡保护元件动作。

稳态不平衡保护包括不平衡 I 段(报警段)和不平衡 III 段动作。当满足式(1)和式(2)时,经过设定的延时后,装置动作于报警或跳闸。暂态不平衡保护包括不平衡 II 段跳闸报警和不平衡 II 段保护动作。雅砻江换流站 5631 滤波器 BP13 高压电容器的不平衡保护 I、II、III 段比例系数定值分别为 0.039 7%、0.092 3%、0.118 8%。

2 高压电容器不平衡电流分析

针对高压电容器 H 桥部分电容单元断开、某电容单元内部部分电容元件断开两类典型故障工况,分别详细推导故障条件与不平衡电流的对应关系。

2.1 部分电容器单元断开

将 BP13 滤波器的高压电容器等效为如图 2 的电路结构,H 桥 4 个桥臂的等效电容依次为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ;流过 4 个桥臂的电流依次为 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 ;不平衡电流为 i_{ub} ;滤波器穿越电流为 i_{tro} 。

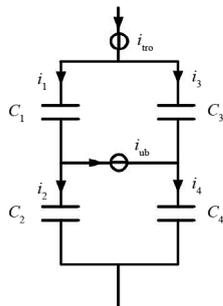


图 2 高压电容器等效电路结构

依据图 2,不平衡电流与穿越电流的比值为

$$\frac{i_{ub}}{i_{tro}} = \frac{i_1 - i_2}{i_{tro}} \quad (3)$$

根据电路原理, i_1 、 i_2 为

$$i_1 = \frac{C_1 i_{tro}}{C_1 + C_3} \quad (4)$$

$$i_2 = \frac{C_2 i_{tro}}{C_2 + C_4} \quad (5)$$

整理式(3)一式(5),可得

$$\frac{i_{ub}}{i_{tro}} = \frac{C_1 C_4 - C_2 C_3}{(C_1 + C_3)(C_2 + C_4)} \quad (6)$$

可以看出在正常运行工况下,4个桥臂电容值相等,不平衡电流为0。

现假设左上桥臂部分电容单元发生故障,此时 $C_1=C_f$ 、 $C_2=C_3=C_4=C$,则不平衡电流与穿越电流的比值改变为

$$\frac{i_{ub}}{i_{tro}} = \frac{C_f - C}{2(C_f + C)} \quad (7)$$

式中,电容值 C 已知,故障桥臂电容值 C_f 由故障条件决定,下面详细推导分析。

为给出普遍性结论,假设单个桥臂的电容单元串并联情况为: m 串 n 并(即 m 行 n 列)。假设每个电容单元的电容值为 C_0 ,则正常工况下4个桥臂的电容值等效为

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C = nC_0/m \quad (8)$$

结合实际运行情况,考虑一种典型的故障工况:桥臂上某一电容单元发生故障后断开,并进一步因过电压使其并联的电容单元故障并断开,最终导致桥臂上某一行有 x 个电容单元断开。此时整个桥臂等效为“ $m-1$ 行 n 列”和“1行 $n-x$ 列”两个电容组合串联,则 C_f 为

$$C_f = \frac{[nC_0/(m-1)][(n-x)C_0]}{nC_0/(m-1) + (n-x)C_0} = \frac{n(n-x)C_0}{n + (n-x)(m-1)} \quad (9)$$

将式(8)、式(9)代入式(7)中,整理可得

$$\frac{i_{ub}}{i_{tro}} = \frac{-x}{2x + 4mn - 4mx} \quad (10)$$

可以看出,不平衡电流与穿越电流的比值只与电容排布方式、故障条件有关。

2.2 某电容器单元内部部分电容元件断开

雅砻江换流站 BP13 滤波器的高压电容器 m 取

30、 n 取2,代入式(10)中可知,一只电容单元完全断开后不平衡电流与穿越电流比值可以达到8.197%,远超不平衡保护的動作閾值,故进一步研究一个电容单元未完全断开(内部部分电容元件断开)的工况。

假设桥臂上只有一只电容单元内部部分电容发生故障断开,导致电容单元的等效电容由 C_0 变为 kC_0 ,则故障桥臂电容可由将式(9)中 x 替换为 $1-k$ 得到

$$C_f = \frac{n(n-1+k)}{n + (n-1+k)(m-1)} C_0 \quad (11)$$

同理,不平衡电流与穿越电流比值为

$$\frac{i_{ub}}{i_{tro}} = \frac{k-1}{4mn + (2-4m)(1-k)} \quad (12)$$

将 $m=30$ 、 $n=2$ 代入后整理式(12)可得

$$\left| \frac{i_{ub}}{i_{tro}} \right| = \frac{|k-1|}{118k + 122} \quad (13)$$

式中,由于雅砻江换流站 BP13 高压电容器单支电容单元内部采用14并4串的电容元件结构, k 的范围取 $[1/14, 1]$ 。 k 取 $1/14$ 意味着4串电容元件都只剩一个完好,若再有一个断开则 k 直接降为0,即整个电容单元都断开。

综合以上分析,得到电容单元内部故障后剩余电容与不平衡电流的关系,如图3所示。可以看出,剩余电容越小,不平衡电流则越大,且不平衡电流对于剩余电容的变化越敏感。在 $k=1/14$,即电容单元未完全断开的最严重工况下,不平衡电流与穿越电流的比值为7.12%;而在仅有一个电容元件断开,即电容单元未完全断开的最轻微工况下, k 为0.981,此时不平衡电流与穿越电流的比值为0.008%。

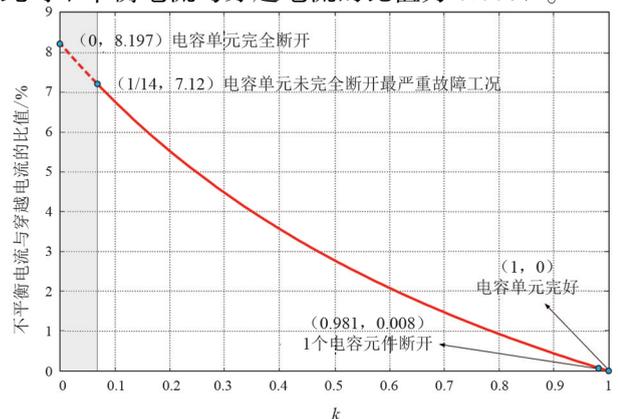


图3 电容单元内部故障后剩余电容与不平衡电流的关系

3 高压电容器过电压分析

在明确高压电容器故障与不平衡电流之间关系的基础上,进一步推导电容单元故障后电容器不同位置的过电压情况。

假设高压电容器左上桥臂某一行有 x 个电容单元断开,参考式(9)可知,故障后左上桥臂电容 C_f 减小,此时整个上桥臂承受电压增大。

为便于分析,忽略故障后高压电容器整体电压的变化,设其值为 U_c ,故障前上桥臂电压 U_{up} 为 $0.5U_c$,故障后上桥臂电压 U'_{up} 可以表示为

$$U'_{up} = \frac{2C}{C_f + 3C} U_c \quad (14)$$

将式(8)、式(9)代入式(14),整理可得

$$U'_{up} = \frac{2mn - 2mx + 2x}{4mn - 4mx + 3x} U_c \quad (15)$$

即上桥臂整体承受的过电压倍数为

$$P'_{up} = \frac{U'_{up}}{U_{up}} = \frac{4mn - 4mx + 4x}{4mn - 4mx + 3x} \quad (16)$$

对于非故障上桥臂(右上桥臂),桥臂内部的电容完好,电压在各个电容单元行上均分,因此 P'_{up} 同时也是桥臂内部电容单元所承受的过电压倍数。而对于故障上桥臂(左上桥臂),由于故障行与非故障行电压不均分,还需进一步考虑桥臂内部的电压分配关系。

桥臂内部故障行承受的过电压倍数为

$$P'_f = \frac{4mn - 4mx + 4x}{4mn - 4mx + 3x} \cdot \left[1 + \frac{(m-1)x}{m(n-x) + x} \right] \quad (17)$$

桥臂内部非故障行承受的过电压倍数为

$$P'_{uf} = \frac{4mn - 4mx + 4x}{4mn - 4mx + 3x} \cdot \left[1 - \frac{x}{m(n-x) + x} \right] \quad (18)$$

从式(17)和式(18)可以看出,相乘得到故障行过电压倍数 P'_f 的两个系数均大于 1,而相乘得到非故障行过电压倍数 P'_{uf} 的两个系数一个大于 1、一个小于 1。这说明了故障行必然承受过电压、非故障行承受过电压与否受电容排布方式和故障条件的影响。

综上可知,滤波器部分电容单元故障后断开可能引起其他正常电容单元过电压,且过电压倍数同

样只与桥臂电容排布方式、故障条件有关。过电压应主要考虑两个方面:1)某桥臂某行中有电容单元断开后,会导致该行正常电容单元承受过电压;2)某桥臂某行中有电容单元断开后,会导致与该桥臂并联的桥臂整体承受过电压。相比之下,第一种过电压情况更为严重。

4 仿真分析

为验证所做推导并进一步开展仿真分析,依据 ± 800 kV 雅砻江换流站交流滤波器高压电容器参数,在 PSCAD/EMTDC 平台搭建 BP13 滤波器模型。高压电容器桥臂采用电容单元 2 并 30 串的结构,电容单元内部采用电容元件 14 并 4 串的结构。

4.1 不平衡电流理论推导仿真验证

对于雅砻江换流站高压电容器结构而言,考虑某行有电容单元完全断开时,断开的电容单元个数可以取 1 或者 2,对这两种故障工况下的不平衡电流计算值、仿真值进行了对比。另外,若电容单元未完全断开,而是内部仅有部分电容元件断开时,故障条件更为复杂。考虑两种典型工况:1)内部 4 串电容元件均只剩一个完好,即电容单元未完全断开的最严重工况,此时等效电容系数 k 为 $1/14$;2)内部仅有一个电容元件断开,即电容单元未完全断开的最轻微工况,此时等效电容系数 k 为 0.981。

表 1 给出了上述 4 种工况下的理论计算值与仿真值对比结果,其中 i_{ub}/i_{tro} 表示不平衡电流与穿越电流的比值。可以看出,仿真值与计算值基本一致,验证了不平衡电流理论推导的正确性。

表 1 不平衡电流仿真结果与计算值对比

电容单元断开个数	k	i_{ub}/i_{tro} 计算值/%	i_{ub}/i_{tro} 仿真值/%
2	—	50	50
1	—	8.197	8.159
0	1/14	7.12	7.119
0	0.981	0.00 799	0.00 781

4.2 电容过电压理论推导仿真验证

针对滤波器桥臂电容单元断开个数取 1、2 两种故障工况,分别对比了桥臂整体过电压倍数 P'_{up} 、桥臂内部故障行过电压倍数 P'_f 、桥臂内部非故障行过

电压倍数 P'_{uf} 的计算值与仿真值,结果如表 2 所示。可以看出,仿真值与计算值基本一致,验证了过电压理论推导的正确性。

表 2 过电压仿真结果与计算值对比

电容单元 断开个数	位置	过电压倍数 计算值	过电压倍数 仿真值
2	P'_{up}	1.333 3	1.330 7
	P'_f	40.000 0	39.928 1
	P'_{uf}	0	0
1	P'_{up}	1.008 1	1.008 0
	P'_f	1.951 2	1.951 4
	P'_{uf}	0.975 6	0.975 6

4.3 不平衡保护动作工况仿真分析

由上面分析计算可知,在 1 个电容单元完全断开的工况下,不平衡电流与穿越电流比值可以达到 8.197%,远超不平衡保护的動作閾值。为此,基于仿真模型进一步从不平衡保护的实际行动閾值出发,反推可以导致相应不平衡电流的故障条件以及过电压情况。

考虑单个电容单元内部某行有多个电容元件断开的典型故障工况,不平衡保护 I 段、II 段、III 段分别对应的故障工况如表 3 所示。可以看出,若某个电容单元内部某行的 14 个电容元件中有 8 个断开,其他行完好,则不平衡电流可以达到不平衡保护三段定值。此时该电容单元内部故障电容元件所在行承担 1.992 7 倍过电压(由其他完好电容元件承担),该过电压远大于故障电容单元整体的所在故障行承受的过电压。

表 3 不平衡保护三段定值对应的故障工况

不平衡保护 动作情况	电容元件 断开个数	P'_f	内部故障行过 电压倍数
I 段 ($i_{ub}/i_{tuo}=0.039\ 7\%$)	4	1.046 4	1.331 3
II 段 ($i_{ub}/i_{tuo}=0.092\ 3\%$)	7	1.107 7	1.772 9
III 段 ($i_{ub}/i_{tuo}=0.118\ 8\%$)	8	1.138 8	1.992 7

5 结 论

针对±800 kV 雅砻江换流站交流滤波器 BP13 高压电容器的不平衡电流及过电压开展研究,以期 为高压电容器故障分析、保护定值优化等提供理论

支撑和技术参考。主要结论如下:

1) 针对高压电容器部分电容单元断开、某电容单元内部部分电容元件断开两类典型故障工况,分别推导了故障条件与不平衡电流的对应关系。结果表明,不平衡电流与穿越电流的比值只与电容排布方式、故障条件有关。

2) 推导了部分电容单元断开后高压电容器不同位置的过电压情况,其中,故障行的非故障电容单元承受的过电压最为严重。过电压倍数同样只与电容排布方式、故障条件有关。

3) 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了所做分析推导的正确性,并进一步给出了雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡保护三段定值分别对应的故障条件及过电压情况。

参考文献

- [1] 林圣,牟大林,刘磊,等.基于特征谐波阻抗比值的 HVDC 直流滤波器高压电容器接地故障保护方案[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6617-6626.
- [2] 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[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(4):1-6.
- [3] 田邑安,张万荣,行鹏,等.±800 kV 特高压直流工程直流滤波器设计研究[J].高压电器,2012,48(10):73-75.
- [4] 张万荣,黄莹,苟锐锋,等.±800 kV 特高压直流工程直流滤波器设计关键问题研究[J].南方电网技术,2009,3(6):35-39.
- [5] 梅念,李银红,陈东,等.HVDC 工程交/直流滤波器高压电容器不平衡保护的判据研究[J].电网技术,2011,35(12):229-234.
- [6] 黄金海,冯雷,李曼丽,等.糯扎渡送电广东特高压直流输电工程直流滤波器 C1 不平衡保护研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(15):46-51.
- [7] 库晓斐,蔡泽祥,徐敏.高压直流输电系统交流滤波器故障与保护分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(19):150-155.

作者简介:

刘磊(1993),男,博士,工程师,主要研究方向为特高压直流输电控制与保护。

(收稿日期:2022-08-10)