

# H型接线高压滤波电容器组不平衡电流保护判据及定值

肖遥, 张晋寅, 黎建平, 楚金伟, 杨晓峰

(南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663)

**摘要:** 着重介绍 H 接线方式下高压滤波电容器组不平衡保护的定值的整定原则。提出滤波器组的失谐度, 完好电容器单元的过电压水平及其允许值是滤波电容器组不平衡保护整定的基本原则。对 H 型电容器组的元件失效或者短路故障分别结合失谐度和过电压进行数理分析。结合内熔丝型电容器单元和无熔丝型电容器单元的不同故障性质, 给出了电容器组不平衡保护的整定值计算分析方法和最终的整定计算公式。形成 H 型电容器组不平衡电流保护计算的理论基础。

**关键词:** 滤波器; 电容器; 不平衡保护; 保护整定计算

## Criterion and settings of unbalanced current protection for filter capacitor bank of H configuration

XIAO Yao, ZHANG Jinyin, LI Jianping, CHU Jinwei, YANG Xiaofeng

(Maintenance and Test Center of Extra High Voltage Power Transmission Co.,

China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** The paper mainly introduces the principles to calculate the settings of unbalanced current protection for H-configured capacitor banks. The basic principles of the permitted detuning of the filter banks and the withstand voltages on remaining perfect capacitor units after some units' failures are proposed. Mathematical analysis of elements failures or short circuit of H capacitor banks is made together with detuning and overvoltage respectively. Combining with different fault property of both the internal fused and fuseless capacitors, the setting calculation analysis method of capacitor bank unbalanced protection and final formulations of setting calculation are given. The paper constitutes the basis for the unbalanced protection of H-configured capacitor banks.

**Key words:** filters; capacitor banks; unbalanced protection; protective settings and calculation

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2015)18-0120-09

## 0 引言

HVDC 换流站布置的交、直流滤波器的高压电容器组常布置成 H 型接线, 主要考虑电容器单元或者内部元件故障后如何保证电容器组不失谐, 或者剩余完好单元不再继续损坏<sup>[1-3]</sup>。已有多篇文章介绍 H 型接线电容器的保护原理及定值计算问题<sup>[4-12]</sup>, 但大多采用数值计算, 通过曲线及图表来分析如何给出定值。这种计算方式简单, 结果直观; 但是概念不清, 无法根据数学物理模型深入分析其本质。

已建的高压电容器组不平衡电流保护以保护电容器单元内的元件为目标, 这将使保护整定值小, 保护动作值太灵敏, 导致滤波器在仍能发挥滤波功能的条件下经常动作跳闸。真正的保护整定原则应该是电容器部分失效后仍能保证: (1) 滤波器不失谐; (2) 剩余电容器单元不至于因部分单元故障而承

受过电压。

本文通过分析电容器组不同故障条件下的电容量允许偏差、电容器端电压增量的大小及其允许值探讨不平衡电流保护定值的设置。

将从三方面进行分析: (1) 电容器元件短路; (2) 内熔丝型电容器单元内部元件故障; (3) 无熔丝型电容器单元内部元件故障。

## 1 不平衡保护的整定原则

H 型接线的电容器结构见图 1。设各臂各有  $N$  只电容器单元串联, 电容器组共有  $4N$  只单元。如单元电容器的电容量为  $C_u$ , 则各臂的电容量  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_u / N = C$ , 电容器组的电容量为

$$C_H = \frac{(C_1 + C_2)(C_3 + C_4)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} = C \quad (1)$$

正常情况下, 图 1 电流互感器  $TA_D$  上没有电流。不平衡保护主要通过检测式(2)的电流比值来判断电容器组是否出现故障及故障的程度。该判别式的优点是不受系统电压波动的影响, 其结果仅反映故障时刻电容器组的平衡状态。

$$\frac{I_{\Delta H}}{I_H} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{C_3}{C_3 + C_4} \quad (2)$$

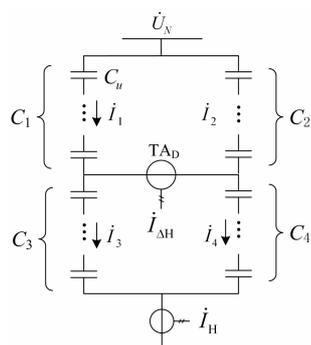


图 1 H 型接线的高压电容器组

Fig. 1 H type configuration of capacitor bank

H 型接线电容器组的不平衡保护的缺陷: 对称支路上交替出现元件故障, 如支路  $C_1$  和  $C_2$  出现元件故障, 或者支路  $C_1$  和  $C_3$  交替出现元件故障, 即便是故障元件数量达到了上述跳闸要求, 实际判别式(2)的  $|I_{\Delta H}/I_H|$  仍非常小, 不能启动跳闸。为此, 需要通过检测不平衡电流的突变量判断和累计元件故障数量, 辅助决策并启动跳闸信号。

H 型电容器组的不平衡保护整定的原则如下:

1) 保证滤波器的失谐度小于 1% 的要求

单调谐滤波器的失谐度计算公式及允许值为

$$\delta_F = \frac{\Delta f}{f_R} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) = \delta_f + \frac{1}{2} (\delta_L + \delta_C) \leq 1\% \quad (3)$$

若系统频率偏差  $\delta_f = 0$  且电感量偏差  $\delta_L = 0$ , 一旦单调谐滤波器的电容量变化  $\delta_C \geq 2\%$ , 将使滤波器的失谐度  $\delta_F \geq 1\%$ 。滤波器失谐将导致滤波功能不正常, 谐波源产生的谐波将注入到系统。严重时可能导致滤波器与系统之间的谐振, 造成滤波器过载损坏, 并威胁系统安全。

多调谐滤波器所允许的高压电容量偏差  $\delta_C$  应略大于单调谐的偏差允许值。具体的偏差量  $\delta_C$  应该在满足滤波器失谐度  $\delta_F \leq 1\%$  的条件下, 通过计算或者调谐试验得出。

2) 电容器组出现部分电容器单元故障后, 余下完好电容器单元的端电压不应超过 1.05 倍的额定电压

DL/T 840-2003<sup>[13]</sup>规定: 电容器单元在 1.05 倍额定电压下可以长期运行。在 1.1 倍额定电压下,

每 24 h 可以运行 8 h。IEC 60871.1-2005<sup>[14]</sup>亦有类似要求。

以上两个原则为基础, 下面分析  $\Pi$  型接线电容器组故障后的总电容量  $C_{H,F}$  及其相对偏差  $\Delta C_H/C$ , 并通过故障支路剩余完好电容单元的端电压相对于额定电压的允许增量  $(\Delta \dot{U}_{u,C_i}/\dot{U}_{u,N}) \leq k_{\text{norm}}$  ( $k_{\text{norm}} = 0.05$ , 按照长期允许过电压考虑) 以及故障电容器单元内部完好元件端电压相对于其额定电压的允许增量  $(\Delta \dot{U}_{e,C_i}/\dot{U}_{e,N}) \leq k_e$  ( $k_e = 0.1$ , 按照 24 h 中允许 8 h 运行上限考虑) 的判据, 推导不同故障方式下不平衡电流保护整定计算公式及其整定值。分析过程中假定电容器组的端电压  $\dot{U}_N$  在故障前后不变。

## 2 内熔丝电容器单元和无熔丝电容器单元的内部结构

用于滤波的电容器单元(unit)主要有两种: (1) 内熔丝单元; (2) 无熔丝单元。

内熔丝型电容器单元内部结构如图 2。单元内部共有  $p \times s$  只元件(element), 先由  $p$  只元件并联组成并联模块(module), 然后  $s$  个并联模块串联。当并联模块中某只元件短路后, 同一并联模块中其他元件将通过故障元件放电, 将故障元件的熔丝熔断。但是当同一并联模块的元件故障到一定数量  $m$  之后, 剩余  $p-m-1$  只完好元件储存的能量不足以熔断第  $m+1$  只故障元件的熔丝, 将导致该并联模块短路。

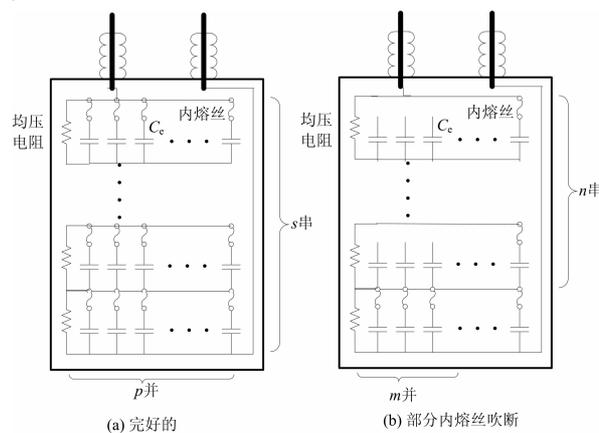


图 2 内熔丝型电容器单元

Fig. 2 Internal fused capacitor unit

无熔丝电容器单元的内部元件联接方式有三种: (1) 先并后串型; (2) 先串后并型; (3) 混合型。先并后串型在其中一个电容元件击穿后, 势必造成整个模块失效。混合型无熔丝单元由于内部结构的

多样性, 本文不作分析。本文重点讨论先串后并型。

先串后并型无熔丝电容器单元的内部结构见图3, 其内部先是  $s$  只元件  $C_e$  串联组成串联模块, 然后  $p$  只串联模块并联。无熔丝电容器故障过程: 串联模块中某元件故障短路, 由于串联模块中剩余完好元件上的电压增加, 将可能导致剩余元件继续短路, 最终导致整个串联模块击穿, 使电容器单元短路。

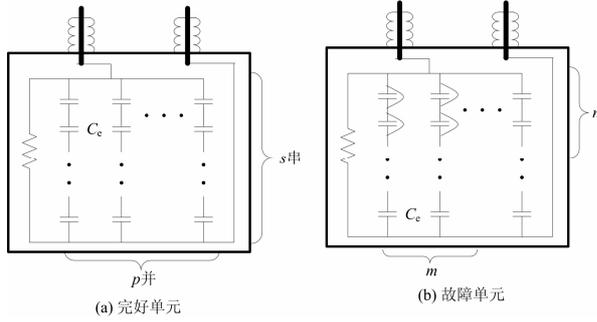


图3 无熔丝电容器单元

Fig. 3 Fuseless capacitor unit

因此, 将内熔丝和无熔丝型电容器组正常条件下各单元上的电压  $\dot{U}_{u,N}$  作为额定电压, 则

$$\dot{U}_{u,N} = \frac{1}{2N} \dot{U}_N \quad (4)$$

对于元件的端电压, 则有

$$\dot{U}_{e,N} = \frac{1}{2sN} \dot{U}_N \quad (5)$$

### 3 部分内熔丝电容器单元短路的分析

首先分析内熔丝型电容器单元出现部分并联模块短路后的行为。支路  $i(i=1,2,3,4)$  的电容器臂有  $d$  个串联模块短路之后, 该支路余下完好  $sN-d$  个串联模块组成的总电容量将增大至:

$$C_{i,F} = \frac{sN}{sN-d} C \quad (6)$$

1)  $C_1$  支路部分并联模块短路

此条件下其余各支路的电容量正常, 但  $C_1$  支路电容量变为

$$C_{1,F} = C_{i,F} \quad (7)$$

电容器组的总电容量

$$C_{H,F} = \left(1 + \frac{d}{4sN-3d}\right) C \quad (8)$$

而滤波器失谐度所允许的电容容量相对变化为

$$\frac{\Delta C_H}{C} = \frac{d}{4sN-3d} \leq \delta_C \quad (9)$$

因此, 该条件下允许短路的并联模块数  $d_{\delta_{C_1}}$  为

$$d_{\delta_{C_1}} \leq \frac{4\delta_C}{1+3\delta_C} \times sN \quad (10)$$

满足此条件的不平衡保护跳闸整定值应该为

$$\frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} = \frac{d}{4sN-2d} \Big|_{d=d_{\delta_{C_1}}} = \frac{\delta_C}{1+\delta_C} \quad (11)$$

此时故障支路  $C_1$  中完好模块的电压将增加

$$\dot{U}_{e,C_1} = \frac{4sN}{4sN-3d} \dot{U}_{e,N} \quad (12)$$

该完好并联模块上电压的相对增量应满足

$$\frac{\Delta \dot{U}_{e,C_1}}{\dot{U}_{e,N}} = \frac{3d}{4sN-3d} \leq k_{\text{norm}} \quad (13)$$

此条件下允许的最大短路模块数为

$$d_{\Delta U_{C_1}} \leq \frac{4k_{\text{norm}}}{3+3k_{\text{norm}}} \times sN \quad (14)$$

按照保护整定原则, 选择最小并联模块数

$$d_{C_1} = \min\left(\frac{4\delta_C}{1+3\delta_C}, \frac{4k_{\text{norm}}}{3+3k_{\text{norm}}}\right) \times sN \quad (15)$$

此条件下不平衡电流保护的跳闸整定值为

$$\frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} = \frac{d}{4sN-2d} \Big|_{d=d_{\Delta U_{C_1}}} = \frac{k_{\text{norm}}}{3+k_{\text{norm}}} \quad (16)$$

因为按照式(11), 当  $C_1$  由  $t$  个模块短路发展到  $t+1$  个模块短路时, 不平衡电流的增量

$$\frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \Big|_{d=t+1} - \frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \Big|_{d=t} = \frac{4sN}{[4sN-2(t+1)](4sN-2t)} > 0 \quad (17)$$

故判别无熔丝电容器单元内部至少有一个并联模块短路的判别式为

$$\Delta \left| \frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \right| \geq \frac{d}{4sN-2d} \Big|_{d=1} = \frac{1}{4sN-2} \quad (18)$$

2)  $C_1$  与  $C_3$  支路各有  $d$  段并联模块短路

当  $C_1$  与  $C_3$  支路各有  $d$  个并联模块短路时, 不平衡电流  $\dot{I}_{\Delta H} = 0$ , 保护式(2)不起作用。此时  $C_1$  与  $C_3$  支路的电容量为

$$C_{1,F} = C_{3,F} = C_{i,F} \quad (19)$$

电容器组的总电容量为

$$C_{H,F} = \left(1 + \frac{d}{2sN-2d}\right) C \quad (20)$$

按照电容量偏差允许值

$$\frac{\Delta C_H}{C} = \frac{d}{2(sN-d)} \leq \delta_C \quad (21)$$

允许单臂支路短路的模块数为

$$d_{\delta_{C_1+C_3}} \leq \frac{2\delta_C}{1+2\delta_C} \times sN \quad (22)$$

同时,  $C_1$  与  $C_3$  支路剩余完好并联模块上的电

压增量应该小于  $k_{\text{norm}}$

$$\frac{\Delta \dot{U}_{e,F}}{\dot{U}_{e,N}} = \frac{d}{sN-d} \leq k_{\text{norm}} \quad (23)$$

按照电压增量允许值, 得到的单臂并联模块短路数的上限值

$$d_{\Delta U_{C1/C3}} \leq \frac{k_{\text{norm}}}{1+k_{\text{norm}}} \times sN \quad (24)$$

此条件下不平衡保护跳闸时应该检测并计量到的并联模块短路故障的数量为

$$d_{C1+C3} = \min\left(\frac{k_{\text{norm}}}{1+k_{\text{norm}}}, \frac{2\delta_C}{1+2\delta_C}\right) \times 2sN \quad (25)$$

3)  $C_1$  和  $C_2$  支路各有  $d$  模块短路  
此条件下  $C_1$  和  $C_2$  支路的电容量为

$$C_{1,F} = C_{2,F} = C_{i,F} \quad (26)$$

整组电容量为

$$C_{H,F} = \left(1 + \frac{d}{2sN-d}\right) C \quad (27)$$

按照电容容量偏差允许值

$$\frac{\Delta C_H}{C} = \frac{d}{2sN-d} \leq \delta_C \quad (28)$$

有

$$d_{\delta_{C1+C2}} \leq \frac{2\delta_C}{1+\delta_C} \times sN \quad (29)$$

同时,  $C_1$  和  $C_2$  支路余下完好并联模块上的电压

$$\dot{U}_{e,F} = \left(1 + \frac{d}{2sN-d}\right) \dot{U}_{e,N} \quad (30)$$

依照允许的电压增量应该小于  $k_{\text{norm}}$ , 有

$$\frac{\Delta \dot{U}_{e,F}}{\dot{U}_{e,N}} = \frac{d}{2sN-d} \leq k_{\text{norm}} \quad (31)$$

对应此条件所允许单臂并联模块短路的数量为

$$d_{\Delta U_{C1/C2}} \leq \frac{2k_{\text{norm}}}{1+k_{\text{norm}}} \times sN \quad (32)$$

综合式(29)和式(32), 不平衡保护跳闸时应累计监测并计量到并联模块短路数量为

$$d_{C1+C2} = \min\left(\frac{2k_{\text{norm}}}{1+k_{\text{norm}}}, \frac{2\delta_C}{1+\delta_C}\right) \times 2sN \quad (33)$$

#### 4 内熔丝电容器单元内部元件开路故障的不平衡电流及过电压计算

设单个元件的电容量为  $C_e$ , 则电容器单元(unit)的电容量为

$$C_u = \frac{p}{s} C_e \quad (34)$$

正常条件下各支路的电容量为

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C = \frac{pC_e}{sN} \quad (35)$$

假设某电容器支路中有  $n$  ( $n < sN$ ) 个并联模块故障, 且每并联模块中各有  $m$  ( $m < p$ ) 只元件被隔离(图 2(b)).

损坏的  $n$  个并联模块中剩余元件的总电容量

$$C_{(p-m) \times n} = \frac{p-m}{n} C_e \quad (36)$$

余下  $(sN-n)$  完好并联模块的总电容量

$$C_{p \times (sN-n)} = \frac{p}{sN-n} C_e \quad (37)$$

支路  $i$  出现  $m \times n$  只元件被隔离后的总电容量

$$C_{i,F} = \frac{C_{(p-m) \times n} C_{p \times (sN-n)}}{C_{(p-m) \times n} + C_{p \times (sN-n)}} = \left[1 - \frac{mn}{(p-m)sN + mn}\right] C \quad (38)$$

1)  $C_1$  支路有  $m \times n$  只元件被隔离

$C_1$  支路由于损失部分电容元件, 因此该支路故障后的总电容量将减少为

$$C_{1,F} = C_{i,F} \quad (39)$$

同时导致电容器组的总电容量减少为

$$C_{H,F} = \left[1 - \frac{mn}{4(p-m)sN + 3mn}\right] C \quad (40)$$

按照电容容量偏差许可值

$$\frac{\Delta C_H}{C} = \frac{mn}{4(p-m)sN + 3mn} \leq \delta_C \quad (41)$$

有

$$\frac{mn}{p-m} \leq \frac{4\delta_C}{1-3\delta_C} \times sN \quad (42)$$

由此导致的不平衡电流最大值为

$$\frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} = \frac{-mn}{4(p-m)sN + 2mn} = \frac{-\delta_C}{1-\delta_C} \quad (43)$$

因为  $C_1$  的电容量变小, 使  $C_3$  和  $C_4$  支路各并联模块的电压降低。在满足式(41)的条件下,  $C_2$  支路各并联模块的电压增量应该小于  $k_{\text{norm}}$ 。

$$\frac{\Delta U_{u_{C2}}}{U_{u,N}} = \frac{mn}{4(p-m)sN + 3mn} \leq k_{\text{norm}} \quad (44)$$

按照此条件有

$$\frac{mn}{p-m} \leq \frac{4k_{\text{norm}}}{1-3k_{\text{norm}}} \times sN \quad (45)$$

满足上式的不平衡电流保护跳闸整定值为

$$\frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} = \frac{-mn}{4(p-m)sN + 2mn} = \frac{-k_{\text{norm}}}{1 - k_{\text{norm}}} \quad (46)$$

而  $C_1$  支路故障并联模块的电压为

$$\dot{U}_{e,F} = \left[ 1 + \frac{4msN - 3mn}{4(p-m)sN + 3mn} \right] \dot{U}_{e,N} \quad (47)$$

若以故障并联模块中剩余元件不出现雪崩效应为前提, 则故障并联模块上的端电压应满足

$$\frac{\Delta \dot{U}_{e,F}}{\dot{U}_{e,N}} = \frac{m(4sN - 3n)}{4psN - m(4sN - 3n)} \leq k_e \quad (48)$$

将式(42)和式(48)联立求解, 得到单臂支路中有元件故障并隔离条件下, 不平衡电流保护动作时应累计监测到的故障元件总数为

$$m \leq \frac{k_e + 3\delta_C}{1 + k_e} p \quad (49)$$

$$mn \leq \frac{4\delta_C}{1 + k_e} \times psN \quad (50)$$

因式(43)中, 有

$$\left| \left( \frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \right)_{m=t+1} - \left( \frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \right)_{m=t} \right| > 0, \left| \left( \frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \right)_{n=t+1} - \left( \frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \right)_{n=t} \right| > 0 \quad (51)$$

因此

$$\Delta \left| \frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \right| \geq \left| \frac{-mn}{4(p-m)sN + 2mn} \right|_{m=1} = \frac{1}{4(p-1)sN + 2} \quad (52)$$

是单只元件被隔离前后不平衡电流保护突变量的最小值。

2)  $C_1$  与  $C_3$  同时出现同样数量  $m \times n$  只元件被隔离

$C_1$  与  $C_3$  同时出现同样数量的  $m \times n$  只电容元件开路时, 不平衡电流将等于 0, 此时

$$C_{1,F} = C_{3,F} = C_{i,F} \quad (53)$$

$$C_{H,F} = \left[ 1 - \frac{mn}{2(p-m)sN + 2mn} \right] C \quad (54)$$

电容器组的电容量变化应满足

$$\frac{\Delta C_H}{C} = \frac{mn}{2(p-m)sN + 2mn} \leq \delta_C \quad (55)$$

因此有

$$\frac{mn}{p-m} \leq \frac{2\delta_C}{1-2\delta_C} \times sN \quad (56)$$

由于  $n$  段并联模块故障后, 故障模块的电容量减少, 其电压升高, 使完好并联模块的电压降低。若以故障模块上的电压作为跳闸条件, 则故障模块的电压

$$\dot{U}_{e,F} = \frac{psN}{psN - msN + mn} \dot{U}_{e,N} \quad (57)$$

该电压增量应该满足

$$\frac{\Delta \dot{U}_{e,F}}{\dot{U}_{e,N}} = \frac{m(sN - n)}{psN - m(sN - n)} \leq k_e \quad (58)$$

联立式(55)、式(58)求得单臂故障的元件总数为

$$m \leq \frac{k_e + 2\delta_C}{1 + k_e} \times p \quad (59)$$

$$mn \leq \frac{2\delta_C}{1 + k_e} \times psN \quad (60)$$

3)  $C_1$  和  $C_2$  同时出现同样数量  $m \times n$  只元件被隔离此条件下

$$C_{1,F} = C_{2,F} = C_{i,F} \quad (61)$$

电容器组的总电容量

$$C_{H,F} = \frac{2(p-m)sN}{2(p-m)sN + mn} C \quad (62)$$

按照电容量偏差允许值

$$\frac{\Delta C_H}{C} = \frac{mn}{2(p-m)sN + mn} \leq \delta_C \quad (63)$$

其解为

$$\frac{mn}{p-m} \leq \frac{2\delta_C}{1-\delta_C} sN \quad (64)$$

$C_1$  和  $C_2$  电容量降低后, 完好并联模块上的电压将降低, 但是故障并联模块上的电压将升高:

$$\dot{U}_{e,F} = \left[ 1 + \frac{2msN - mn}{2psN - (2msN - mn)} \right] \dot{U}_{e,N} \quad (65)$$

$$\frac{\Delta \dot{U}_{e,F}}{\dot{U}_{e,N}} = \frac{2msN - mn}{2psN - (2msN - mn)} \leq k_e \quad (66)$$

联立式(64)、式(66)求解, 得到单臂故障的元件总数为

$$m \leq \frac{k_e + \delta_C}{1 + k_e} \times p \quad (67)$$

$$mn \leq \frac{2\delta_C}{1 + k_e} \times psN \quad (68)$$

## 5 内熔丝电容器组的保护判据

1) 不平衡电流的保护跳闸判据

根据电容器组电容量的最大允许偏差  $\delta_C$ 、电容元件允许的正常过电压增量相对于额定电压的倍数  $k_{\text{norm}}$ , 综合比较式(11)、式(15)、式(43)、式(46)后, 得出单臂支路故障条件下的保护动作值为

$$\left| \frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \right| = k \times \min \left( \frac{\delta_C}{1 + \delta_C}, \frac{k_{\text{norm}}}{3 + k_{\text{norm}}}, \frac{k_{\text{norm}}}{1 - k_{\text{norm}}} \right) \quad (69)$$

其中,  $k=0.85\sim 0.95$ , 是可靠系数。

2) 电容器组平衡故障条件下的保护判据

当出现上文分析提到的平衡型故障时, 保护检测到的不平衡电流为 0, 此时应该启用记数的方式来跳闸。

通过不平衡电流保护获取相对不平衡电流差值在  $t-1$  时刻到  $t$  时刻的突变量  $\Delta T^{(t)} = (I_{\Delta H}/I_H)^{(t)} - (I_{\Delta H}/I_H)^{(t-1)}$ 。如果所述  $\Delta T^{(t)}$  满足  $|\Delta T^{(t)}| \geq k/(4sN-2)$ ,  $k=0.85\sim 0.95$ , 则计算串联组件短路的累计数量:  $D^{(t)} = D^{(t-1)} + \text{int} \left[ \left| \Delta T^{(t-1)} \right| \times (4sN-2) + 0.2 \right]$ , 其中 int 是取整数计算;  $D^{(t)}$  的初始值  $D^{(0)} = 0$ ;

比较式(10)、式(14)、式(25)和式(33), 当

$$D^{(t)} \geq \min \left( \frac{2\delta_C}{1+3\delta_C}, \frac{2k_{\text{norm}}}{3+3k_{\text{norm}}} \right) \times 2sN \quad (70)$$

时, 保护动作跳闸。

如果突变量满足  $k/(4sN-2) > |\Delta T^{(t)}| \geq k/[4(p-1)sN+2]$ ,  $k=0.85\sim 0.95$ , 累计电容元件开路总数:  $E^{(t)} = E^{(t-1)} + \text{int} \left\{ \left| \Delta T^{(t-1)} \right| \times [4(p-1)sN+2] + 0.2 \right\}$ ,  $E^{(t)}$  的初始值  $E^{(0)} = 0$ ;

比较式(49)、式(50)、式(59)、式(60)、式(67)、式(68), 当

$$E^{(t)} \geq \min \left( \frac{\delta_C + k_e}{1+k_e} \times 2p, \frac{4\delta_C}{1+k_e} \times psN \right) \quad (71)$$

时, 保护动作跳闸。

## 6 无熔丝电容器单元内部元件短路

本节只对图 3 示先串后并的无熔丝电容器单元构成的 H 型电容器组进行分析。正常时, 电容器单元内部某一串联模块的电容量为

$$C_s = \frac{C_e}{s} \quad (72)$$

电容器单元的电容量为

$$C_u = pC_s = \frac{p}{s} C_e \quad (73)$$

正常条件下, H 型电容器组每支路有  $N$  只电容器单元, 因此

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = \frac{1}{N} C_u = \frac{p}{sN} C_e = C \quad (74)$$

设某一支路  $i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 计有  $a$  只电容器单元故障, 每单元各有  $m$  只串联模块中的  $n$  只元件被击穿短路。此时, 单只故障单元的电容量为

$$C_{u,F} = \frac{p-m}{s} C_e + \frac{m}{s-n} C_e = \frac{p(s-n)+mn}{p(s-n)} C_u \quad (75)$$

$a$  只故障单元的总电容量

$$C_{u \times a, F} = \frac{C_{u,F}}{a} = \frac{p(s-n)+mn}{ap(s-n)} C_u \quad (76)$$

支路  $i$  余下  $N-a$  只完好单元的总电容量

$$C_{i, N-a} = \frac{1}{N-a} C_u = \frac{N}{N-a} C \quad (77)$$

支路  $i$  的总电容量

$$C_{i,F} = \frac{N[p(s-n)+mn]}{N[p(s-n)+mn]-amn} C \quad (78)$$

如果  $n=s$ , 表示整个单元被击穿。此时

$$C_{i,F} = \frac{N}{N-a} C \quad (79)$$

此条件下, 第 3 节关于内熔丝型电容器单元短路的分析过程适用于无熔丝单元短路的分析。

1) 支路  $C_1$  中有  $(a$  单元  $\times m$  串联模块  $\times n$  元件) 只元件短路的分析

此时  $C_{1,F} = C_{i,F}$ , 电容器组的总电容量

$$C_{H,F} = \left\{ 1 + \frac{amn}{4N[p(s-n)+mn]-3amn} \right\} C \quad (80)$$

按照电容量偏差限制

$$\frac{\Delta C_H}{C} = \frac{amn}{4N[p(s-n)+mn]-3amn} \leq \delta_C \quad (81)$$

有

$$\frac{amn}{p(s-n)+mn} \leq \frac{4\delta_C}{1+3\delta_C} \times N \quad (82)$$

此条件下的不平衡电流

$$\frac{I_{\Delta H}}{I_H} = \frac{amn}{4N[p(s-n)+mn]-2amn} = \frac{\delta_C}{1+\delta_C} \quad (83)$$

因为  $\left. \frac{I_{\Delta H}}{I_H} \right|_{m=t+1} - \left. \frac{I_{\Delta H}}{I_H} \right|_{m=t} > 0$ , 且  $\left. \frac{I_{\Delta H}}{I_H} \right|_{n=t+1} - \left. \frac{I_{\Delta H}}{I_H} \right|_{n=t} > 0$ ,

并  $\left. \frac{I_{\Delta H}}{I_H} \right|_{a=t+1} - \left. \frac{I_{\Delta H}}{I_H} \right|_{a=t} > 0$ , 故检测单只元件短路时,

不平衡电流的突变量最小值为  $a=m=n=1$  时的值:

$$\Delta \left| \frac{I_{\Delta H}}{I_H} \right|_{\min} = \left| \frac{I_{\Delta H}}{I_H} \right|_{a=1, m=1, n=1} = \frac{1}{4N[p(s-1)+1]-2} \quad (84)$$

由于  $C_1$  支路故障单元上电容量增加, 其端电压降低

$$\dot{U}_{u,F} = \frac{4Np(s-n)}{4N[p(s-n)+mn]-3amn} \dot{U}_{u,N} \quad (85)$$

但是故障单元内故障模块上完好元件的电压升高

$$\dot{U}_{e,F} = \frac{U_{u,F}}{s-n} = \frac{4psN}{4N[p(s-n)+mn]-3amn} \dot{U}_{e,N} \quad (86)$$

故障模块上完好元件的电压增量允许值为

$$\frac{\Delta \dot{U}_{e,F}}{\dot{U}_{e,N}} = \frac{4npN - mn(4N - 3a)}{4psN - [4npN - mn(4N - 3a)]} \leq k_e \quad (87)$$

将式(87)的解

$$4npN - mn(4N - 3a) \leq \frac{4k_e}{1 + k_e} \cdot psN \quad (88)$$

与式(82)联立求解, 有

$$amn \leq \frac{4\delta_c}{1 + k_e} \times psN \quad (89)$$

$$(p - m)n \leq \frac{k_e - 3\delta_c}{1 + k_e} \times ps \quad (90)$$

相应的不平衡电流保护判别式动作值为

$$\frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} = \frac{amn}{4psN - [4pnN - mn(4N - 3a)] + amn} = \frac{\delta_c}{1 + \delta_c} \quad (91)$$

$C_1$  支路部分单元内部元件短路后, 完好单元上的电压将升高

$$\dot{U}_u = \left\{ 1 + \frac{3amn}{4N[p(s-n) + mn] - 3amn} \right\} \dot{U}_{u,N} \quad (92)$$

该电压增量应满足

$$\frac{\Delta \dot{U}_u}{\dot{U}_{u,N}} = \frac{3amn}{4N[p(s-n) + mn] - 3amn} \leq k_{\text{norm}} \quad (93)$$

将上式的解

$$\frac{amn}{p(s-n) + mn} \leq \frac{4k_{\text{norm}}}{3 + 3k_{\text{norm}}} N \quad (94)$$

代入到电容器的不平衡电流保护判别式中, 有

$$\frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} = \frac{amn}{4N[p(s-n) + mn] - 2amn} = \frac{k_{\text{norm}}}{3 + k_{\text{norm}}} \quad (95)$$

$C_3$  和  $C_4$  支路属于完好支路, 其各单元的电压增量

$$\frac{\Delta \dot{U}_{u,C_{3,4}}}{\dot{U}_{u,N}} = \frac{amn}{4N[p(s-n) + mn] - 3amn} \leq k_{\text{norm}} \quad (96)$$

$$\frac{amn}{p(s-n) + mn} \leq \frac{4k_{\text{norm}}}{1 + 3k_{\text{norm}}} N \quad (97)$$

在此条件下的不平衡电流

$$\frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} = \frac{amn}{4N[p(s-n) + mn] - 2amn} = \frac{k_{\text{norm}}}{1 + k_{\text{norm}}} \quad (98)$$

2)  $C_1$  和  $C_3$  各有( $a$  单元 $\times m$  串 $\times n$  并)只元件短路的分析

此条件下  $C_1$  和  $C_3$  支路的电容量

$$C_{1,F} = C_{3,F} = C_{i,F} \quad (99)$$

电容器组的电容量

$$C_{H,F} = \left\{ 1 + \frac{amn}{2N[p(s-n) + mn] - 2amn} \right\} C \quad (100)$$

电容量偏差应满足

$$\frac{amn}{2N[p(s-n) + mn] - 2amn} \leq \delta_c \quad (101)$$

对应的解为

$$\frac{amn}{p(s-n) + mn} \leq \frac{2\delta_{cH}}{1 + 2\delta_{cH}} N \quad (102)$$

因  $C_1$  和  $C_3$  是对称故障,  $C_1$  和  $C_3$  支路上的电压维持不变。尽管故障单元因电容量增加, 使两端的电压降低。但是故障串联模块上完好元件的电压将上升

$$\frac{\dot{U}_{e,F}}{\dot{U}_{e,N}} = 1 + \frac{npN - (N - a)mn}{psN - npN + (N - a)mn} \quad (103)$$

若要求电压增量满足

$$\frac{\Delta \dot{U}_{e,F}}{\dot{U}_{e,N}} = \frac{npN - (N - a)mn}{psN - npN + (N - a)mn} \leq k_e \quad (104)$$

则联立式(102)、式(104)求解后单臂支路允许的故障元件总数为

$$(p - m)n \leq \frac{k_e - 2\delta_{cH}}{1 + k_e} ps \quad (105)$$

$$amn \leq \frac{2\delta_{cH}}{1 + k_e} psN \quad (106)$$

同时, 故障支路中完好单元上的电压将上升, 完好单元上的电压增量应该满足

$$\frac{\Delta \dot{U}_u}{\dot{U}_{u,N}} = \frac{amn}{N[p(s-n) + mn] - amn} \leq k_{\text{norm}} \quad (107)$$

相应地有

$$\frac{amn}{p(s-n) + mn} \leq \frac{k_{\text{norm}}}{1 + k_{\text{norm}}} N \quad (108)$$

3)  $C_1$  和  $C_2$  各有( $a$  单元 $\times m$  串联模块 $\times n$  元件)只元件短路的分析

此条件下  $C_1$  和  $C_2$  故障支路的电容量

$$C_{1,F} = C_{2,F} = \frac{N[p(s-n) + mn]}{N[p(s-n) + mn] - amn} C \quad (109)$$

电容器组的电容量

$$C_H = \left\{ 1 + \frac{amn}{2N[p(s-n) + mn] - amn} \right\} C \quad (110)$$

按照电容器偏差的要求

$$\frac{\Delta C_H}{C} = \frac{amn}{2N[p(s-n) + mn] - amn} \leq \delta_c \quad (111)$$

因此有

$$\frac{amn}{p(s-n)+mn} \leq \frac{2\delta_c}{1+\delta_c} N \quad (112)$$

$C_1$  和  $C_2$  支路完好单元上的电压增量不超过  $k_{\text{norm}}$  倍

$$\frac{\Delta \dot{U}_u}{\dot{U}_{u,N}} = \frac{amn}{2N[p(s-n)+mn]-amn} \leq k_{\text{norm}} \quad (113)$$

$$\text{有 } \frac{amn}{p(s-n)+mn} \leq \frac{2k_{\text{norm}}-N}{1+k_{\text{norm}}} N \quad (114)$$

而  $C_1$  和  $C_2$  支路故障单元上的电压

$$\dot{U}_{u,F} = \frac{Np(s-n)}{2N[p(s-n)+mn]-amn} \dot{U}_{u,N} \quad (115)$$

故障单元内故障串联模块上完好元件的电压增量

$$\frac{\Delta \dot{U}_{e,F}}{\dot{U}_e} = \frac{2npN - (2N-a)mn}{2psN - [2npN - (2N-a)mn]} \leq k_e \quad (116)$$

因此

$$2npN - (2N-a)mn \leq \frac{2k_e}{1+k_e} psN \quad (117)$$

联立式(112)、式(117)求解, 有

$$(p-m)n \leq \frac{k_e - \delta_c}{1+k_e} ps \quad (118)$$

$$amn \leq \frac{2\delta_c}{1+k_e} psN \quad (119)$$

## 7 无熔丝电容器组的保护判据

### 1) 不平衡电流的保护跳闸判据

根据式(83)、式(98), 综合单元元件故障的分析, 不平衡电流的跳闸判据为

$$\left| \frac{\dot{I}_{\Delta H}}{\dot{I}_H} \right| = k \times \min \left( \frac{\delta_c}{1+\delta_c}, \frac{k_{\text{norm}}}{1+k_{\text{norm}}} \right) \quad (120)$$

### 2) 平衡故障条件下的保护判据

当出现上文分析提到的平衡型故障时, 保护检测到的不平衡电流为 0, 此时应该启用记数的方式来跳闸。

不平衡电流差值在  $t-1$  时刻到  $t$  时刻的突变量  $\Delta T^{(t)} = (\dot{I}_{\Delta H} / \dot{I}_H)^{(t)} - (\dot{I}_{\Delta H} / \dot{I}_H)^{(t-1)}$  并判别是否属于元件级故障:

$$\frac{k}{4sN-2} > |\Delta T^{(t)}| \geq \frac{k}{4N[p(s-1)+1]-2} \quad (121)$$

如果  $t$  时刻的突变量  $\Delta T$  满足上式, 则计算电容元件短路的累计数:  $E^{(t)} = E^{(t-1)} + \text{int} \{ |\Delta T^{(t-1)}| \times [4N(p(s-1)+1)-2] + 0.2 \}$ ,  $E^{(t)}$  的初始值  $E^{(0)} = 0$ ;

比较式(89)、式(106)、式(119)可知, 当

$$E^{(t)} \geq \frac{4\delta_c}{1+k_e} \times psN \quad (122)$$

时, 保护跳闸。

如果  $\Delta T^{(t)}$  满足

$$|\Delta T^{(t)}| \geq k / (4sN - 2) \quad (123)$$

或连续的几次突变量  $\Delta T^{(t)}$ 、 $\Delta T^{(t-1)}$ 、 $\dots$ 、 $\Delta T^{(t-j)}$  符号相同且满足

$$|\Delta T^{(t)} + \Delta T^{(t-1)} + \dots + \Delta T^{(t-j)}| \geq k / (4sN - 2) \quad (124)$$

则可判断为单元级短路, 可以参照内熔丝单元短路的方式进行记数并跳闸。

## 8 讨论

目前 HVDC 用交、直流滤波器电容器组都是要求电容器制造厂家提供保护配置方案及整定值。以内熔丝电容器为例, 制造厂从保护电容器元件的角度出发, 当某只电容器内部的一个并联模块出现数只元件隔离之后, 为防止同一模块下剩余元件出现熔丝群爆, 要求滤波器组跳闸, 最多是当其中一个模块出现短路时就跳闸。但是这种模式下, 滤波器组的电容量变化很小, 远不足以导致滤波器失谐, 且剩余完好模块上的电容器单元上的电压也未达到 1.05 倍的额定电压。

按照电容器制造厂给出的整定值, 将导致频繁更换电容器, 增加运行成本。实际上, 电容器单元具有不可修复性质, 按照整台电容器单元完全失效故障后跳闸是最为经济且能保障系统和电容器安全的模式。这要求电容器厂提高电容器箱体的防爆等级, 在内部元件出现群爆的条件下电容器仍能不爆裂漏油。

对于 HVDC 使用的高压交、直流滤波器, 如果通过本文方式的计算, 将保护定值提高到单台电容器单元故障时跳闸, 可将保障滤波器不至于失谐, 并可保障剩余完好电容器单元不因过电压而继续损坏, 同时可以减少频繁跳闸的现象。

## 9 结论

本文明确了将滤波器的失谐度和剩余完好电容器单元的极间过电压水平作为滤波电容器保护整定计算的基本原则。结合 H 型电路, 分别给出了内熔丝型和无熔丝型的电容器组的不平衡电流的整定计算方法。

电容器元件级的故障分析也在本文中做了介绍, 可在实际中作为电容器组的状态检测加以应用。

本文只是 H 型电容器电路不平衡保护分析的一个例子, 应用时要结合实际电容器电路进行分析。

确定定值的另一个重要因素是当出现数量为  $d$  的单元短路后, 剩余完好电容器单元的极对外壳的耐压水平不应该超过厂商给出的限定值。限于篇幅, 本文没有对部分电容器单元故障后完好电容器单元极对外壳的电压耐受能力进行详细的分析过程介绍。这种分析也是确定电容器保护定值上限的重要内容, 具体计算要用到类似 PSCAD 的数字仿真软件。

参考文献

[1] 肖遥, 夏谷林, 张楠. H 和Π接线高压滤波电容器组不平衡电流保护的定值计算及比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊): 239-245.  
XIAO Yao, XIA Gulin, ZHANG Nan. Configuration and settings for unbalanced current protection of high voltage filter capacitors: comparison of H-type and Π-type connections[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S): 239-245.

[2] IEEE std. C37.99-2012 IEEE guide for the protection of shunt capacitor banks[S].

[3] 梁琮. IEEE 电容器组保护新理念及对我国标准制定工作的启示[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 75-79.  
LIANG Cong. New idea in IEEE guide for protection of shunt capacitor banks and its enlightenment for working out related standards in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 75-79.

[4] 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.  
MEI Nian, LI Yinhong, CHEN Dong, et al. Criteria of unbalance protection for high voltage capacitors in AC/DC filters of HVDC power transmission projects[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 229-234.

[5] 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 unbalanced protection for high voltage capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 85-89.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 文继锋, 陈松林, 李海英, 等. 超高压直流系统中的直流滤波器保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 69-72.  
WEN Jifeng, CHEN Songlin, LI Haiying, et al. DC filter protection in HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 69-72.

[9] 吴萍, 杨振东. 电容器不平衡保护告警原因分析[J]. 华中电力, 2010, 23(1): 45-48.  
WU Ping, YANG Zhendong. Reason analysis of capacitor unbalance protection alarm[J]. Central China Electric Power, 2010, 23(1): 45-48.

[10] 李建勋, 吴贻志, 李豹. 交流滤波器 C1 电容器保护配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 139-144.  
LI Jianxun, WU Yizhi, LI Bao. Study on the coordination strategy of the C1 capacitor protection of AC filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 139-144.

[11] 段涛, 张智勇, 李德建, 等. ±500 kV 换流站交流滤波器组不平衡电流调整新策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 135-139, 143.  
DUAN Tao, ZHANG Zhiyong, LI Dejian, et al. The new unbalanced current adjusting strategy of AC filter in ± 500 kV converter station[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 135-139, 143.

[12] 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.  
HUANG Jinhai, FENG Lei, LI Manli, et al. Study of DC filter C1 unbalance protection for Nuozhadu-Guangdong ultra HVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 46-51.

[13] DL/T 840-2003 高压并联电容器使用技术条件[S].  
DL/T 840-2003 specification of high-voltage shunt capacitor for order[S].

[14] IEC 60871.1-2005 shunt capacitors for A.C. power systems having a rated voltages above 1000 V - part 1: general[S].

收稿日期: 2014-11-10; 修回日期: 2015-07-20

作者简介:

肖遥(1960-), 男, 南方电网超高压输电公司技术专家, 从事电能质量、直流输电、电气测量技术研究多年; E-mail: hbxiaoyao@sina.com

张晋寅(1986-), 男, 工程师, 从事高电压试验技术方法的研究;

黎建平(1988-), 男, 助理工程师, 从事电气试验技术研究。

(编辑 葛艳娜)