

考虑温度因素的特高压并联电容器 双桥差不平衡电流保护整定方法

王紫琪, 和敬涵, 王小君, 罗国敏

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 特高压并联电容器规模庞大, 元件数量众多, 各元件工作条件和工作环境存在明显差异。环境条件可改变电容器自身参数, 进而影响桥差保护的可靠性与灵敏性。在现行双桥差不平衡电流保护的基础上, 对温度因素的影响进行深入讨论。通过理论分析, 得到考虑温度因素的不平衡电流值计算方法, 并进行简化处理, 制定出切实可行的保护整定方案。根据实际工程参数, 利用 PSCAD 搭建仿真模型并对所提方法进行论证, 具有理论价值和实际工程意义。

关键词: 外界因素; 温度; 内熔丝; 双桥差不平衡电流保护; 并联电容器组; 整定计算

Double-bridge unbalance current protection setting method for EHV shunt capacitor banks considering temperature influence

WANG Ziqi, HE Jinghan, WANG Xiaojun, LUO Guomin

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiao Tong University, Beijing 100044, China)

Abstract: There are a large number of capacitor units within a capacitor bank. The working environment is obvious different among these units. The capacitance values can be influenced by temperature, thus affecting the unbalance current protection's reliability and sensitivity. The influence of temperature is discussed, which is based on double-bridge unbalance current protection. The theoretical analysis is carried out, and the calculation formula of the unbalance current due to temperature variation is obtained. The work in this paper also contains the simplification of the theory and practical protection setting scheme. The results are demonstrated by simulation with PSCAD. This method has important value both on theory and practical application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277009).

Key words: external factors; temperature; internal fuse; double-bridge unbalance current protection; shunt capacitor; setting calculation

0 引言

特高压并联电容器是特高压系统中的重要组成设备。由于其长期在高电场环境中工作, 且经常受到合闸过电压和涌流的影响^[1], 一直是电力系统故障率较高的设备之一^[2-3]。并联电容器组保护的配置及整定对并联电容器的可靠运行, 甚至整个系统的安全至关重要。现有特高压并联电容器装置一般采用内熔丝保护(图1)充当电容器内部单元的主保护, 双桥差不平衡电流保护充当电容器组的整体后备保护^[4-5]。图2为并联电容器双桥差不平衡电流保护接

线示意图, 该图采用“ M 并 N 串 P 支路”接线方法, 通过采集上下双桥桥臂间电流进行不平衡电流保护。

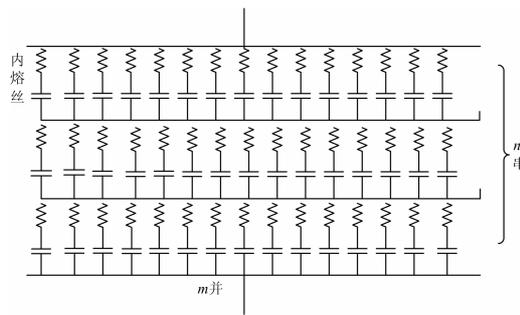


图1 电容器内熔丝保护示意图

Fig. 1 Capacitor internal fuse protection

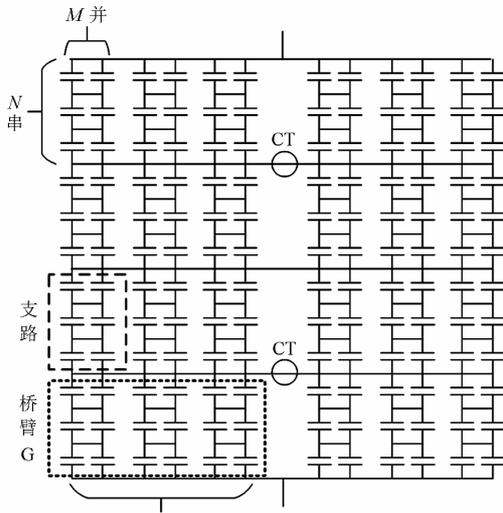


图2 特高压并联电容器双桥差不平衡保护接线

Fig. 2 Double-bridge unbalance current protection wiring structure

特高压并联电容器装置为框架式结构，由于安装位置不同，运行中的日照量，日照时长，散热条件，投切造成的接头发热情况存在差异，不同位置处单元电容值随运行温度实时变化^[6]。温度造成的变化为某一范围内电容值的整体抬升或下降，对桥差不平衡电流值影响较大。据统计，东莞供电局2009年全年发生电容器类设备缺陷共230宗，电容器本体故障引起的损坏占50.725%，其中电容变值占的故障比例为41.739%，电容器容值变化将直接影响不平衡电流的电流值大小，造成保护误动拒动，进一步引发电容器爆炸等严重事故^[7]。河南省某供电公司自2002年8月16日至2006年5月29日的三次电容器开关柜爆炸事故，究其原因，除了产品自身质量，保护配置不当造成的误动和拒动也是引起恶性事故多发的直接原因^[8]。当前亟需开展温度因素对保护影响的研究工作，以解决不平衡电流保护所存在的问题。

文献[9]立足于电容误差、三相电压不平衡等实际情况，提出了开口三角电压、差动相电压、桥差电流等起始不平衡值估算方法，但并未分析外界温度在实际工程中造成的初始不平衡电流变化。文献[10]给出内熔丝保护和双桥差不平衡电流保护的配合整定计算公式，但所考虑情况较为理想，在整个计算过程中并未考虑外界因素的影响。文献[11]中提出用红外测量仪测量电容器外部温度，并建立电容器温度计算模型获得内部温度；文献[12]为监视电容器运行温度，采用在电容器的外壳上设置最热点(粘贴示温蜡片)的试验方法来测量电容器的实际

发热程度。上述方法为电容器实际工作温度获取提供一定的解决思路，但未就温度获取意义及后续工作进行深入讨论。

特高压工程用并联电容器装置容量大，电容单元数量众多，一旦出现共性问题后果不堪设想。本文对现有双桥差不平衡电流保护整定方法进行深入分析及优化处理。通过温度与电容参数之间的理论关系，详细分析了温度差异给双桥差不平衡电流带来的影响。在此基础上，提出了一种考虑温度因素的特高压并联电容器双桥差不平衡电流整定方法，并进行简化计算。通过PSCAD搭建涵盖电容器温度差异的仿真模型，验证了理论分析结果，具有理论价值和实际工程意义。

1 特高压并联电容器保护方法

特高压变电站采用大规模电容器组串并联方式提供无功补偿。电容器台数多、容量大，一般采用内熔丝保护作为主保护，双桥差不平衡电流保护作为后备保护。两者相互配合保障并联电容器组安全运行。

1.1 内熔丝保护

内熔丝保护指的是在单台电容器中，每个电容元件都串联一根内熔丝。如图1所示，电容元件A发生击穿短路时，该元件所在支路电流迅速增大，与之并联的其他完好元件也会对其所在支路放电。大电流使该支路内熔丝迅速熔断，进而隔离故障元件^[13]。

1.2 双桥差不平衡电流保护

熔丝熔断会造成并联补偿电容器桥臂电容分布不均，从而在桥臂之间产生不平衡电流。双桥差不平衡电流保护根据该不平衡电流进行跳闸判断^[14]。依据GB/T 11024《标称电压1 kV以上交流电力系统用并联电容器正常使用条件》中相关规定，由同一串联段最大击穿元件个数和电容器的耐压值，可计算出对应的不平衡电流保护动作值。在不平衡电流达到动作值时，继电保护装置动作将整组电容器切除。在实际工程应用中，内熔丝保护与桥差不平衡电流保护互相协调配合运行。

2 温度对电容器参数的影响分析

在实际应用中，电容参数与温度密切相关。设备安装环境的温差易造成电容器电容值变化。因此，温度对电容器的影响应加以考虑。电容温度系数指的是“在给定的温度间隔内，温度每变化1℃时，电容的变化数值与该温度下的标称电容的比值”。

$$\alpha_c = \frac{1}{C} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta T} \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: α_c 为平均温度系数; C 为某温度下的标称电容; ΔC 表示室温与该温度下所测得的电容容量之差; ΔT 表示室温与该温度之差。在极限温度内, 电容器可正常工作。

设实际温度为 T , 且 T 在电容器正常工作温度范围内。温度 T 下的电容值 C_T 可由式(2)得出。

$$C_T = (\alpha_c \cdot \Delta T + 1)C_{T_0} \quad (2)$$

式中: C_{T_0} 为电容器常温下(25℃)的额定电容。

选用 1 000 kV 变电站 110 kV 出线侧电容器组进行实际计算。由于桥臂封装及安装位置的差异, 为考虑温度因素对桥臂造成整体影响, 温度由安装在每个桥臂上的多个温度传感器采集。各桥臂温度值取该桥臂上采集的多点温度的平均值。

思源电容器的实际参数列举如表 1 所示。选用单台电容器“二并三串三支路”结构, 利用已知电容单元平均温度系数 $-4.3 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 代入计算。

表 1 思源电容器厂家参数

Table 1 Actual parameters of Siyuan capacitor

单台额定容量 Q_c/kvar	单台额定电压 U_c/kV	单台额定电容 $C/\mu\text{F}$	单台额定电流 I_{cc}/A
486.2	6.077	41.907	80.007
电抗率 A	电流互感器 变比 T	单台内元件 并联数 m	单台内元件 串联数 n
0.05	3	14	3

在常态温度(25℃)时单台电容器为额定电容 41.907 μF , 每升高一度电容相对额定电容降低 4.3/10 000, 依据电容平均温度系数的定义可得到不同温度下的桥臂电容值呈线性降低, 如图 3 所示。

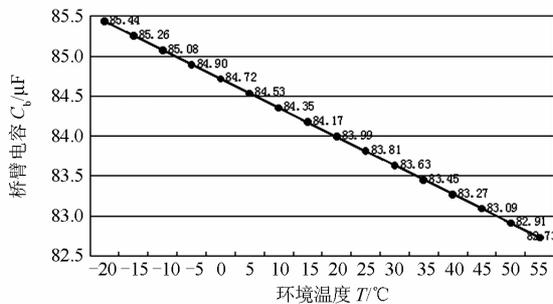


图 3 不同温度下的桥臂电容

Fig. 3 Capacitance of one arm at different temperatures

3 温度对初始不平衡电流值的影响计算

3.1 理论计算公式

并联电容器接线方式如图 2 所示, 其中单台电容器内部元件为 m 并 n 串结构, 单桥臂电容器为“ M 并 N 串 P 支路”结构。仅考虑桥臂 G 发生明显温度

升高。

设元件电容量为 C_c , 桥臂电容量为 C_b , 温度变化后桥臂电容量变为 C_{b1} 。室温与常态温度(25℃)之差为 ΔT , 温升桥臂温度与常态温度(25℃)之差为 ΔT_1 。电网角频率 ω , 出线侧相电压为 U_{ex} 。

考虑温度因素的桥臂的电容可表示为

$$C_b = \frac{C_c \cdot m}{n} \times \frac{M \cdot P}{N} = \frac{(\alpha_c \cdot \Delta T + 1)C_{T_0} \cdot m}{n} \times \frac{M \cdot P}{N} \quad (3)$$

温度导致的臂电容变化率 β_{b0} 为

$$\beta_{b0} = \frac{C_{b1} - C_b}{C_b} = \frac{\alpha_c \Delta T_1 + 1}{\alpha_c \Delta T + 1} - 1 \quad (4)$$

由文献[10]可知, 相电流为

$$I_{ex} = \omega C_b U_{ex} / 2 \quad (5)$$

臂电流为

$$I_b = \omega C_b U_{ex} / 4 \quad (6)$$

温升臂电流变化为

$$\Delta I_{b0} = \beta_{b0} I_b = \frac{\beta_{b0} \omega C_b U_{ex}}{4} \quad (7)$$

不平衡电流为温升臂电流变化值的 1/2。所以, 引起的初始不平衡电流 I_0 为

$$I_0 = \frac{1}{2} \Delta I_{b0} = \frac{\beta_{b0} \omega C_b U_{ex}}{8} \quad (8)$$

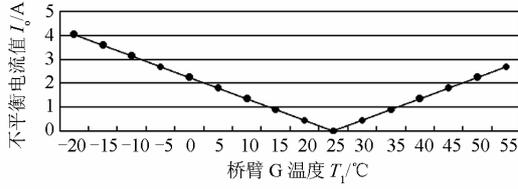
3.2 实际计算验证

代入思源电容器实际数值计算。选取室温 25℃, 桥臂 G 温度 T_1 。利用公式得到 I_0 的计算结果和 PSCAD 仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同温度下的 I_0 计算结果及仿真结果

Table 2 Calculation results and simulation results I_0

at different temperatures			
温度 $T_1/^\circ\text{C}$	温度差 $\Delta T_1/^\circ\text{C}$	I_0 计算结果/A	I_0 仿真结果/A
-20	-45	4.04	4.027 8
-15	-40	3.59	3.583 5
-10	-35	3.14	3.138 3
-5	-30	2.69	2.692 4
0	-25	2.25	2.245 7
5	-20	1.80	1.798 1
10	-15	1.35	1.349 8
15	-10	0.90	0.900 7
20	-5	0.45	0.450 7
25	0	0.00	0.000 0
30	+5	0.45	0.450 6
35	+10	0.90	0.902 1
40	+15	1.35	1.354 3
45	+20	1.8	1.812 5
50	+25	2.25	2.249 8
55	+30	2.7	2.700 3

图 4 不同温度下的初始不平衡电流 I_0 Fig. 4 Initial unbalance currents I_0 at different temperatures

4 温度对双桥差不平衡电流保护影响计算

温度升高会造成电容元件电容值的升高, 导致桥臂电流增大。因此, 熔丝熔断最可能发生在温度升高的桥臂。在某元件支路熔丝熔断后, 与之并联的其他完好元件击穿概率显著增大。所以, 本文重点考虑温升桥臂同一串联段的元件击穿情况。

4.1 理论计算公式

针对上述单台电容器内部元件 m 并 n 串, 电容器“ M 并 N 串 P 支路”接线情况进行分析。设元件电容量为 C_e , 温度升高导致电容量变化为 C_{e1} , 单台电容器电容量为 C_n 。室温与常态温度(25°C)之差为 ΔT , 温升桥臂温度与常态温度(25°C)之差为 ΔT_1 。电网角频率 ω , 出线侧相电压为 U_{ex} 。串联段中切除的故障元件数为 k 。

温升桥臂故障单台电容器的电容量为

$$C_{n1} = \frac{1}{\frac{1}{(m-k)C_{e1}} + \frac{n-1}{mC_{e1}}} = \frac{m(m-k)}{n(m-k)+k} C_{e1} \quad (9)$$

故障支路电容为

$$C_{z1} = \frac{[C_{n1} + (M-1)C_n] \cdot M \cdot C_n / (N-1)}{[C_{n1} + (M-1)C_n] + M \cdot C_n / (N-1)} \quad (10)$$

温升故障桥臂电容为

$$C_{b1} = C_{z1} + (P-1) \cdot \frac{C_n \cdot M}{N} \quad (11)$$

使用文献[10]中引入的故障臂电容变化率 β_b 可得

$$\beta_b = \frac{C_{b1} - C_b}{C_b} = \frac{\left\{ \frac{[Mn(m-k) + (M-1)k] \cdot N}{[NMn(m-k) + (MN-N+1)k]} + (P-1) \right\} C_{e1}}{PC_e} - 1 = \frac{\left\{ \frac{[Mn(m-k) + (M-1)k] \cdot N}{[NMn(m-k) + (MN-N+1)k]} + (P-1) \right\} (\alpha_c \Delta T_1 + 1)}{P(\alpha_c \Delta T + 1)} - 1 \quad (12)$$

故障臂计及温度影响时电流变化为

$$\Delta I_b = \beta_b I_b = \frac{\beta_b \omega C_b U_{ex}}{4} \quad (13)$$

此时考虑温度因素的不平衡电流 I 可以利用式(14)进行计算。

$$I = \frac{1}{2} \Delta I_b = \frac{\beta_b \omega C_b U_{ex}}{8} \frac{[Mn(m-k) + (M-1)k] \cdot N}{[NMn(m-k) + (MN-N+1)k]} + (P-1) \frac{1}{8nN(\alpha_c \Delta T + 1)} \quad (14)$$

$$wC_e m M U_{ex} (\alpha_c \Delta T_1 + 1) - \frac{\omega C_e m M P U_{ex}}{8Nn}$$

在不考虑温差的情况下, 即 ΔT 等于 ΔT_1 , 可得不平衡电流计算公式为

$$I' = \frac{[Mn(m-k) + (M-1)k] \cdot N}{[NMn(m-k) + (MN-N+1)k]} + (P-1) \frac{1}{8nN} \quad (15)$$

$$\omega C_e m M U_{ex} - \frac{\omega C_e m M P U_{ex}}{8Nn}$$

通过上述的理论分析可以看出, 由于故障桥臂的温度较高, 即 ΔT_1 高于 ΔT 。温度因素 T 的引入, 在一定程度上造成了不平衡电流的增大。

4.2 实际计算验证

选用 1 000 kV 变电站 110 kV 出线侧电容器组进行实际计算。已知电容元件温度系数 $-4.3 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 选取温升桥臂温度 30°C , 室温 25°C 。

选用单台电容器“二并三串三支路”结构, 利用思源厂家数据进行计算分析, 代入公式可得化简后的 β_b 为

$$\beta_b = \frac{(756 - 43k) \times 0.99785}{(756 - 42k)} - 1 \quad (16)$$

引起的不平衡电流 I 为

$$I = \frac{1}{2} \Delta I_b = \frac{\beta_b \omega C_b U_{ex}}{8} \quad (17)$$

可得不平衡 I 的计算结果和 PSCAD 仿真实验结果如表 3 所示。

表 3 温差 5°C (室温 25°C , 温升桥臂为 30°C) 不同熔断个数下的不平衡电流 I 计算结果及仿真结果

Table 3 Calculation results and simulation results of unbalance currents (normal temperature: 25°C , high temperature: 30°C)

熔断个数 $k/\text{个}$	β_b	I 计算结果/A	I 仿真结果/A
1	-0.003 5	0.74	0.741 7
2	-0.005 1	1.07	1.071 2
3	-0.006 9	1.44	1.445 2
4	-0.008 9	1.86	1.859
5	-0.011 3	2.36	2.368 1
6	-0.014	2.94	2.946 7
7	-0.017 3	3.61	3.632 1

仿真数据很好地论证上述公式的推导过程的正确性。

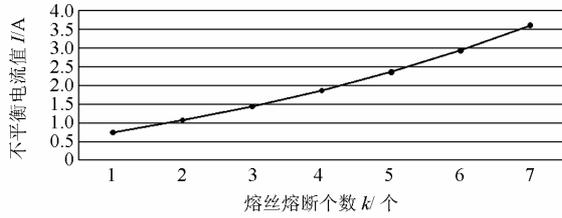


图5 不同熔断个数下的不平衡电流

Fig. 5 Unbalance currents under different fusing number

5 考虑温度因素的不平衡电流动作值设定

5.1 简化计算理论分析

由上文可知, 不考虑温度影响因素的双桥差不平衡电流保护整定计算中的电容变化率为

$$\beta'_b = \frac{[Mn(m-k) + (M-1)k] \cdot N}{[NMn(m-k) + (MN-N+1)k]} + (p-1) - 1 \quad (18)$$

温度对于初始不平衡电流值的影响计算中的电容变化率为

$$\beta_{b0} = \frac{C_{b1} - C_b}{C_b} = \frac{\alpha_c \Delta T_1 + 1}{\alpha_c \Delta T + 1} - 1 \quad (19)$$

考虑高压电容器实际运行情况下, 熔丝熔断发生在温度升高的桥臂。由式(12), (18), (19)可得故障臂电容变化率

$$\beta_b = (\beta'_b + 1)(\beta_{b0} + 1) - 1 = \beta'_b + \beta_{b0} + \beta'_b \cdot \beta_{b0} \approx \beta'_b + \beta_{b0} \quad (20)$$

由式(20)可以清楚看出, 考虑温度因素的故障臂电容变化率在误差允许范围内, 等于不考虑温度的故障臂电容变化率与初始不平衡电流电容变化率之和。此时双桥差不平衡电流为

$$I = \frac{\beta_b \omega C_b U_{ex}}{8} = \frac{(\beta'_b + \beta_{b0}) \omega C_b U_{ex}}{8} = I' + I_0 \quad (21)$$

即在误差允许的范围内, 引入温度因素的切除元件不平衡电流值, 等于不考虑温度因素的不平衡电流值, 加上温度因素引起的初始不平衡电流值。

5.2 数据分析对比

通过 4.2 节中的仿真实验数据, 对比考虑温度因素的不平衡电流值和同一条件下不考虑温度因素的不平衡电流值。求其差值并列举如表 4 所示。引入折线图并对比其关系如图 6 所示。

可以清楚发现: 在误差允许范围内, 其差值可以近似等于该温差情况引起的初始不平衡电流值, 结论成立。

5.3 不平衡电流动作值设定

在上述温差 5°C(室温 25°C, 温升桥臂温度 30°C)的基础上, 进行仿真分析。温度引起电容器容值改

表 4 有无考虑温度因素的不平衡电流值对比

Table 4 Comparison of unbalance currents with and without consideration of temperature factor

考虑温度因素 I/A	不考虑温度因素 I'/A	差值 ΔI
0.741 7	0.292 6	0.449 1
1.071 2	0.622 3	0.448 9
1.445 2	0.996 4	0.448 8
1.859 0	1.424 6	0.434 4
2.368 1	1.919 6	0.448 5
2.946 7	2.498 4	0.448 3
3.632 1	3.184 0	0.448 1

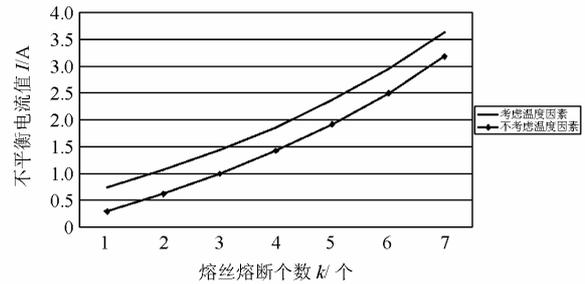


图6 有无温度因素的不平衡电流对比图

Fig. 6 Comparison of unbalance currents with and without consideration of temperature factor

变, 进而造成元件的实际电压的升高和桥臂间不平衡电流的增大。但并联电容器组规模庞大, 电容元件数量众多, 不平衡电流值虽然发生了明显改变, 有强温差时电压升高倍数与无明显温差时的电压升高倍数却差别不大, 具体倍数如表 5 所示。

表 5 有无考虑温度因素的完好元件电压升高倍数及桥差不平衡电流值

Table 5 Overvoltage values and unbalance current values

熔断退出运行元件个数 k/个	忽略温度因素			考虑温度因素		
	完好元件电压升高倍数	完好单台电压升高倍数	不平衡电流值 I'/A	完好元件电压升高倍数	完好单台电压升高倍数	不平衡电流值 I/A
0	1.00	1.00	0	1.00	1.00	0.45
1	1.06	1.01	0.29	1.06	1.01	0.74
2	1.12	1.02	0.62	1.13	1.02	1.07
3	1.20	1.03	0.10	1.20	1.03	1.45
4	1.29	1.04	1.42	1.29	1.04	1.86
5	1.39	1.06	1.92	1.39	1.06	2.37
6	1.51	1.08	2.50	1.51	1.08	2.95
7	1.65	1.10	3.18	1.65	1.10	3.63

依据根据 GB/T11024《标称电压 1 kV 以上交流电力系统用并联电容器正常使用条件》中的相关要求, 当完好元件电压为额定电压的 1.3 倍时, 退出

运行元件数为 4 个, 当完好单台电压为额定电压的 1.1 倍时, 退出运行元件数为 7 个。此时不平衡电流整定值设置应结合温度因素的影响, 在正常整定值的基础上, 直接加入温度引起的初始不平衡电流值, 即可得到误差允许范围内, 考虑外界因素影响下的双桥差不平衡电流整定值。

5.4 实际情况分析

以上分析基于理想情况下, 温度升高引起桥臂电容的统一变化, 但实际工程中温度引起的温升范围不定(可能为小范围的局部温升, 也可能造成多桥臂温度变化), 不同电容单元温度升高不同。因温度因素具有波及范围广、波及电容单元数量大、对单个元件影响小的特点, 所以该整定方法依旧适用。利用 Matlab 产生随机数进行不定量分析, 不同位置元件发生不确定的温度升高时, 在误差允许范围内仍可利用上述方法进行整定计算。

6 结论

在特高压变电站中, 由于电容器设备安装位置不同, 日照量、通风条件存在差异, 易形成电容器组桥臂温差, 进而对不平衡电流造成影响。需充分考虑温度作用进行不平衡电流整定计算。

本文通过理论及仿真分析, 充分论述了温度因素对双桥差保护不平衡电流造成的影响。同时对比考虑该因素与忽略该因素情况下的电流值, 提出的一种计及温度因素的双桥差不平衡电流整定计算方法。该方法考虑不同桥臂之间的温差, 对保护的整定值设定进行优化提升。通过实际分析与简化计算, 得到误差允许范围内的不平衡电流整定值的设定方式, 可更好地反应特高压并联电容器组的实际运行状况。简单易行, 具有实际工程意义。

参考文献

- [1] 邵能灵, 郭培育, 于仲安, 等. Π 模型电容电流补偿的同塔四回线电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 34-42.
TAI Nengling, GUO Peiyu, YU Zhongan, et al. Current differential protection using capacitive current compensating algorithm on Pi-model for four-parallel lines on same towers[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 34-42.
- [2] 马亮, 钱珞江. 谐波对集合式并联电容器内部故障保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 87-90, 118.
MA Liang, QIAN Luojiang. Impact of harmonics on the internal fault protections of assembling capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 87-90, 118.
- [3] 邹蕴韬, 谭亲跃, 朱建行, 等. 超高压线路串补电容的微机保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 45-49.
ZOU Yuntao, TAN Qinyue, ZHU Jianhang, et al. Microprocessor-based protection algorithm in UHV transmission lines with series compensated capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 45-49.
- [4] 王永红, 孟荣, 王玥, 等. 500 kV 变电站并联电容器组保护整定的若干问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 144-147.
WANG Yonghong, MENG Rong, WANG Yue, et al. Problems on settings of shunt capacitor bank protection in 500 kV substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 144-147.
- [5] 严飞, 盛国钊, 倪学锋. 1000 kV 系统用并联电容器组不平衡保护设计[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1856-1861.
YAN Fei, SHENG Guozhao, NI Xuefeng. Study on unbalance protection design of shunt capacitor bank in 1000 kV system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1856-1861.
- [6] 刘文泽, 蔡泽祥, 冯顺萍. 并联电容器组中电容器击穿的特征分析与仿真研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 73-76, 79.
LIU WENZE, CAI ZEXIANG, FENG SHUNPING. Characteristic analysis and simulation of power capacitor breakdown in shunt capacitor bank[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 73-76, 79.
- [7] 王永源. 并联电容器组中电容器损坏特征与过电压保护研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
WANG Yongyuan. The research on characteristic quantities and over voltage protection of capacitor breakdown in a shunt capacitor bank[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [8] 高本锋, 张学伟, 刘辛晔, 等. 高压直流输电保护定值整定流程的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 400-407.
GAO Benfeng, ZHANG Xuewei, LIU Xinye, et al. Research of HVDC protection value setting process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 400-407.
- [9] 杨昌兴, 赵启承, 杨立川, 等. 并联电容器组保护起始不平衡值的估算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010,

- 31(4): 30-34.
YANG Changxing, ZHAO Qicheng, YANG Lichuan, et al. Estimation of the unbalance value of the shunt capacitor bank[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2010, 31(4): 30-34.
- [10] 崔国强, 张鹏, 成小胜. 1000 kV 特高压站电容器组桥差不平衡保护的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(3): 49-55.
CUI Guoqiang, ZHANG Peng, CHENG Xiaosheng. The application of differential protection for the unbalanced capacitor in 1000 kV high voltage station[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2012, 33(3): 49-55.
- [11] 刘文泽, 蔡泽祥, 黄松波, 等. 高压电力电容器内部最热点温度的计算模型[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 82-84.
LIU Wenzhe, CAI Zexiang, HUANG Songbo, et al. Calculation model of HV power capacitor internal hottest-spot temperature[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 82-84.
- [12] 王文杰, 马建, 陈鑫. 高温高热对电力电容器的影响及处理措施[J]. 电气技术, 2013(2): 105-106, 109.
WANG Wenjie, MA Jian, CHEN Xin. The effects of high temperature and high temperature on power capacitor and its treatment measures[J]. Electrical Engineering, 2013(2): 105-106, 109.
- [13] 肖遥, 张晋寅, 黎建平, 等. H 型接线高压滤波电容器组不平衡电流保护判据及定值[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 120-128.
XIAO Yao, ZHANG Jinyin, LI Jianping, et al. Criterion and settings of unbalanced current protection for filter capacitor bank of H configuration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 120-128.
- [14] 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.

收稿日期: 2015-11-14; 修回日期: 2016-02-05

作者简介:

王紫琪(1992-), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 14117390@bjtu.edu.cn

和敬涵(1964-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统在线监测、保护与控制, 电能质量, 新能源接入及智能电网, 轨道交通电气化等; E-mail: jhhe@bjtu.edu.cn

王小君(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量在线监测技术、电力系统分析与控制等。E-mail: xjwang1@bjtu.edu.cn

(编辑 姜新丽)