

并联电容器不平衡电流保护的改进方法研究

盛小伟, 黄梅, 阎波

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 并联电容器不平衡电流保护是通过检测电容器组三相不平衡电流来判断电容器组内部是否发生故障, 从而给出报警信号或者跳闸信号使电容器组退出运行。不平衡电流保护不能够识别故障相、不能够对三相平衡故障保护以及在多相同时发生故障时会发生误操作。为了克服这些缺陷, 对电容器不平衡电流保护进行了改进方法的研究。分析了中性点接地电容器组内部故障时的内部过电压和相电流变化, 并给出了相应计算公式。同时, 提出了在检测、判断不平衡电流的同时增加对三相电流变化进行判断的改进方法, 该改进方法能够克服不平衡电流保护的缺陷。

关键词: 并联电容器组; 内部过电压; 三相平衡故障; 过电流保护; 不平衡电流保护

中图分类号: TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)21-0014-04

0 引言

并联电容器组通常是按照所需要的额定电压和额定容量将许多电容器元件(或简称元件)^[1]按照一定的方式进行串、并联组成的。电容器组内部电容器元件因故障退出运行后, 母线电压将在剩余的电容器元件或单元(由一个或多个电容器元件组装于单个外壳中并有引出端子的组装体)上重新分配而造成内部过电压。因此, 电容器组继电保护装置需要检测出电容器组内部过电压的大小, 从而决定是发出告警信号还是将整个电容器组退出运行。对于中性点接地的星形电容器组的内部过电压保护, 不平衡电流保护是一种常用的方法。

1 中性点接地电容器组的连接及内部故障分析

并联电容器组可以分为带内部熔丝的和不带内部熔丝的两种, 下面分析它们内部过电压的原理。

1.1 带内部熔丝的电容器组

图 1 所示为有内部熔丝的三相电容器组结构示意图, 在每一相中, N 个电容器元件并联组成一个单元, M 个单元串联组成该相电容器组。内部熔丝是用来断开故障的电容器元件, 从而使该电容器单元的其余部分以及接有该电容器单元的电容器组继续运行^[2]。

假设 A 相一单元内部有 F 个元件故障被熔丝断开后, 设电容器组母线相电压为 1.0 (标么值), 故障单元电压值、故障单元过电压值倍数、故障相电流

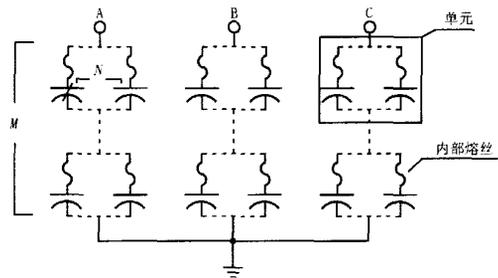


图 1 带内部熔丝的电容器组结构

Fig 1 Capacitor bank configuration with internal fuse

变化值分别由算式 (1)、(2)、(3) 给出。

$$\text{无故障时单相电容器组总容抗: } X_{\Sigma} = \frac{M}{N \cdot c}$$

$$\text{故障单元容抗: } X_{cf} = \frac{1}{(N - F) \cdot c}$$

$$\text{故障后其它完好单元的总容抗: } X_{cm-1} = \frac{M - 1}{N \cdot c}$$

故障单元电压:

$$V_{cf} = \frac{X_{cf}}{X_{cf} + X_{cm-1}} = \frac{N}{M(N - F) + F} \quad (1)$$

故障单元过电压倍数:

$$k = \frac{V_{cf}}{1/M} = \frac{MN}{M(N - F) + F} \quad (2)$$

$$\text{故障相电流: } I_{cf} = \frac{V_{cf}}{X_{cf}} = \frac{N \cdot c}{(M - 1) + N / (N - F)}$$

故障相电流变化值:

$$I_{cf} \% = \frac{|I_{cf} - I_N|}{I_N} = \frac{100F}{M(N - F) + F} \quad (3)$$

式(3)中, k_n 为额定电流 ($k_n = \frac{M}{N_c}$), 可以发现故障相电流比额定相电流小。

1.2 不带内部熔丝的电容器组

图2所示为无熔丝的电容器组。当某一单元中的元件因绝缘击穿被短路时, 该单元中其余良好元件都被短接, 导致该单元整体退出运行。此时, 相对地电压就在剩余的完好单元上重新分配, 会造成剩余单元的过电压。假设A相中有 F 个单元因故障退出运行, 设电容器组母线相电压为 1.0 (标么值), 剩余单元过电压倍数和相电流变化值由算式(4)、(5)给出。

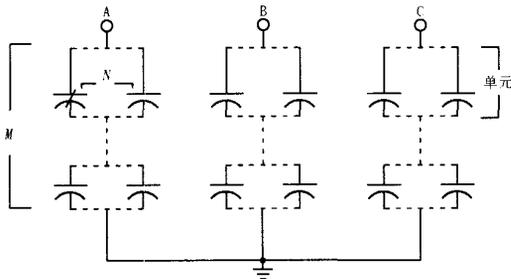


图2 无熔丝的电容器组结构图

Fig 2 Fuseless capacitor bank configuration

电容器单元的额定电压: $V_N = \frac{1}{M}$

故障后剩余完好单元电压: $V_{mf} = \frac{1}{M - F}$

剩余单元过电压 (过电流) 倍数:

$$k = \frac{M}{M - F} \tag{4}$$

故障相电流变化值:

$$I_n \% = \frac{|I_{cf} - k_n|}{k_n} = \frac{100F}{M - F} \tag{5}$$

由上面分析可知: 带内部熔丝的电容器组内部某些元件故障后被熔丝断开退出运行, 故障元件所在单元剩余完好的电容器元件将承受过电压, 故障相电流比额定电流小; 无熔丝的电容器组内部元件故障会导致元件所在单元被短路而整体退出运行, 该相剩余完好的电容器单元将承受过电压和过电流, 且过电压倍数和过电流倍数相等。

2 不平衡电流保护及其缺陷

并联电容器的外部过电压和过电流继电保护对电容器内部元件损坏引起的过电压和过电流是起不到监测和保护作用的。因为装在母线上的电压互感器对电容器组内部元件或单元过电压是无法检测到

的, 内部故障造成的电流变化也不会使过流保护启动。电容器组内部过电压通常采用不平衡保护, 通过采用不同的电容器组接线和继电保护方式, 可测量到电压或电流的不平衡量, 并用作保护。不平衡保护的主要目的是当邻近故障电容器 (单元) 的完好电容器上的过电压过大时发出警报, 或断开整个电容器组。通常允许过电压不超过 $1.1U_N$ (U_N 为额定电压) [2]。

关于中性点接地星形电容器组的不平衡保护, 文献 [3]、[4] 提出一些不同的方法。本文讨论不平衡电流保护的接线方法及其缺陷, 并给出一种改进方法。对于不平衡电流的检测通常有两种接线方法, 如图3和图4所示。图3为单星形接线, 用一个电流互感器检测中性点对地的三相不平衡电流 (零序电流)。当电容器组内部发生故障时, 三相电流不再平衡, 通过电流互感器将获得 3 倍的零序电流。这种接线对系统电压本身的不平衡敏感, 灵敏度有可能降低。谐波电流 (特别是 3 次谐波) 将流过互感器, 需要滤波器。图4为双星形接线, 是一种差动的检测接线, 它可以克服系统电压不平衡以及谐波带来的影响。

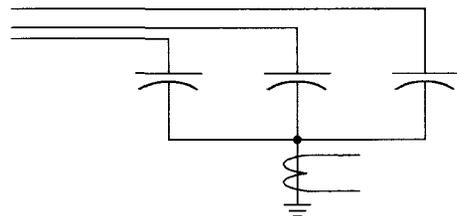


图3 检测单星形中性线电流的不平衡保护方法

Fig 3 Unbalanced protection scheme using neutral-to-ground current detection in a single-wye connected bank

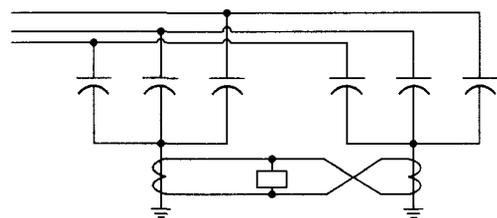


图4 检测双星形接线中性线电流的不平衡保护

Fig 4 Unbalanced protection scheme using neutral-to-ground current detection in a double-wye connected bank

根据检测的不平衡电流, 由式(1)~(5)就可以求出不平衡电流与电容器组内部的过电压倍数之间的对应关系。根据电容器允许在过电压为 1.1 倍额定电压下长期运行的规定, 当过电压倍数小于 1.1

时, 继电保护装置发出报警信号, 大于 1.1, 继电保护装置发出跳闸信号, 将整个电容器组退出运行。

这两种接线方法有着共同的缺陷: 不能够识别故障相; 对三相同时发生相同的故障 (三相平衡故障) 不能够检测到。另外, 双星形接线中, 当两个电容器组发生同样的故障 (以下简称两组对称故障) 也不能够检测出来; 当电容器组中有多相同时发生故障 (不平衡故障), 有时会造成继电保护装置将跳闸信号误判为告警信号。

针对多相同时发生不平衡故障时的误操作, 以单星形接线为例做出解释。分析下面两种情况:

1) A 相中故障元件个数为 F , 而 B、C 相完好。电流互感器检测到 3 倍零序电流值的大小跟 A 相电流变化值是相等的 (如图 5 所示), 即有 $3I_0 = |I_a - I_{af}|$, 假设此时计算出 A 相中故障单元过电压倍数不超过 1.1, 保护装置给出告警信号。

2) A 相中故障元件个数为 $2F$, B 相、C 相故障元件个数为 F 。电流互感器检测到的电流值跟第一种情况相同, 保护装置发出告警信号, 但实际 A 相中故障单元的过电压倍数超过 1.1, 保护装置应该发出跳闸信号。

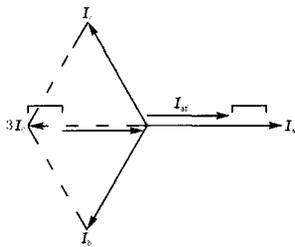


图 5 A 相故障时三相电流相量分析
Fig 5 Three phase current vector analysis
when phase A fault

同样可以分析双星形接线情况下的误操作, 如第一组 A 相中有 F 个单元因故障而短路, 同时, 第二组 A 相中单元因故障而被短路的个数在 $F \sim 2F$ 之间, 这种情况下就会造成将跳闸信号误操作为告警信号。

3 改进方法

上面分析了不平衡电流保护具有自身难以克服的缺陷, 保护装置在某些情况下拒动或误动。目前的微机继电保护装置通常是将电容器组过电压保护、过电流保护和不平衡保护结合在一起的。利用微机保护的特点, 在不平衡保护的判断中增加对相

电流的变化进行判断。这种改进方法可以克服不平衡保护的缺陷, 相电流利用过流保护的三相电流互感器获得, 而无须额外增加电流互感器。

在不平衡电流保护的判断中, 要设置两个电流定值: 告警定值 I_1 , 跳闸定值 I_2 。 I_1 的值取略小于电容器组内部出现一个元件故障, 且电容器组内部单元过电压值未达到 1.1 倍额定电压时的不平衡电流值。 I_2 的值取电容器组内部单元承受过电压等于 1.1 倍额定电压时的不平衡电流值。同时, 为了判断电容器组内部发生故障时相电流的变化, 需要设置两定值 I_3 、 I_4 。 I_3 的大小等于额定相电流值, I_4 等于是内部过电压为 $1.1U_N$ 时的相电流值。实际 I_3 、 I_4 的取值要考虑系统电压的波动引起的误差。下面对改进方法进行讨论, 不平衡电流用 I_0 表示。

1) 当 $I_0 < I_1$ 时, 不平衡检测表明没有发生内部元件故障。但对于单星形接线的电容器组要判断是否出现三相平衡故障, 对于双星形接线的电容器组要同时判断三相平衡故障和两组对称故障。

三相平衡故障

带内部熔丝的电容器组, 当内部出现元件故障时, 相电流变小, 则 $I_3 > I_4$ 。当 $I_4 < I < I_3$ 时, 表明发生了三相平衡故障, 电容器组内部过电压没有超过 $1.1U_N$, 继电保护装置发出告警信号。当相电流 $I < I_4$ 时, 表明发生了三相平衡故障, 且电容器组内部过电压超过 $1.1U_N$, 继电保护装置发出跳闸信号。

不带内部熔丝的电容器组, 当内部出现元件故障时, 故障相电流变大, 则 $I_3 < I_4$ 。当相电流 $I_3 < I < I_4$ 时, 说明发生了三相平衡性故障, 且电容器组内部过电压没有超过 $1.1U_N$, 继电保护装置发出告警信号。当 $I > I_4$ 时, 表明发生三相平衡性故障, 且电容器组内部过电压超过 $1.1U_N$, 继电保护装置发出跳闸信号。

两组对称故障

如果双星形接线中发生两组对称故障, 则两个电容器组会同时在相同的相出现数目相同的故障元件 (如两组同时在 A 相出现 F_1 个故障元件, 在 B 相出现 F_2 个故障元件)。这时通过相电流来判断电容器组内部单元过电压情况与三相平衡故障判断原理相同。

2) 当 $I_1 < I_0 < I_2$, 不平衡检测表明出现内部故障, 内部过电压没有超过 $1.1U_N$, 发出告警信号。但是, 这种情况下需要考虑出现不平衡故障而造成电

容器组内部单元实际过电压已经超过 $1.1U_N$ 。此时,对于相电流的判断,只需要设置一个电流定值 I_0 。对于带内部熔丝的电容器组:当相电流 $I > I_0$,说明没有误判,发出告警信号正确;当相电流 $I < I_0$,说明发生误判,应该发出跳闸信号;对于无熔丝的电容器组:当相电流 $I < I_0$,说明没有误判,发出告警信号正确;当相电流 $I > I_0$,说明发生误判,应该发出跳闸信号。

3)当 $I_0 > I_1$,不平衡检测表明出现内部故障,且电容器组内部存在单元过电压超过 $1.1U_N$,继电保护装置发出跳闸信号。这种情况无需再对相电流做出判断。

需要指出:这里的相电流与电容器组各相的实际电流有差别,它仅是基波电流,不包括谐波电流。

4 结论

关于中性点接地的并联电容器组内部过电压保护,检测不平衡电流是一种经济而有效的方法,但它本身存在难以克服的缺陷。利用微机继电保护的优势,对采样的电压、电流序列进行重复利用。在不平衡电流检测的基础上,借助对相电流的变化进行判断,就很容易判别出三相平衡故障、两组对称故障及不平衡故障以及对故障相的识别。

参考文献:

[1] GB 3983.2 - 89,高压并联电容器[S].

GB 3983.2 - 89, Standard for High Voltage Shunt Capacitors[S].

[2] GB/Z 11024.3 - 2001,标称电压 1 kV 以上交流电力系统用并联电容器——第 3 部分:并联电容器和并联电容器组的保护[S].

GB/Z 11024.3 - 2001, Shunt Capacitor for AC Power Systems Having a Rated Voltage Above 1 kV—Part 3: Protection of Shunt Capacitors and Shunt Capacitor Banks[S].

[3] Bishop M, Day T, Chaudhary A. A Primer on Capacitor Bank Protection[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(4).

[4] Horton R, Warren T, Fender K, et al Unbalance Protection of Fuseless, Split - Wye, Grounded, Shunt Capacitor Banks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(3).

收稿日期: 2006-07-07; 修回日期: 2006-08-08

作者简介:

盛小伟(1974 -),男,硕士研究生,研究方向为并联电容器微机继电保护; E-mail: dqshengxw@master04.bjtu.edu.cn

黄 梅(1959 -),女,教授,研究方向为电力系统建模仿真及控制,电力系统继电保护;

阎 波(1982 -),男,硕士研究生,研究方向为继电保护。

Study of mended unbalanced current protection scheme for shunt capacitor bank

SHENG Xiao-wei, HUANG Mei, YAN Bo

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Shunt capacitor unbalanced current protection can judge whether the outage of internal capacitor elements exists in banks by detecting three-phase unbalanced current to send a warning signal or a trip signal for the bank's breaker to remove the bank from the system. Shunt capacitor unbalanced current protection fails to identify the faulted phase and three-phase balanced failures and causes misoperation when failures exist in two or three phases simultaneously. In order to overcome its disadvantages, a study of mended unbalanced current protection scheme for shunt capacitor is made. This paper analyses the internal overvoltage and the phase current of grounded wye shunt capacitor bank when there are failures in it, and gives corresponding equations. A mended unbalanced current protection scheme is also provided, which requires to judge the phase current variation while detecting and judging the unbalanced current. This mended scheme can overcome those disadvantages of unbalanced current protection.

Key words: shunt capacitor bank; internal overvoltage; capacitor bank three-phase balanced failures; capacitor bank overcurrent protection; unbalanced current protection