

# 并联电容器对变压器差动保护的影响

陈实<sup>1,2</sup> 郭晓<sup>1,2</sup> 张尧<sup>1,2</sup>, 史华勃<sup>3</sup>

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100;

2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211100;

3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 对变压器低压侧区内故障差动保护动作较慢的情况做了详细分析, 指出其原因为并联电容器中的串联电抗器引起故障时刻并联电容器发生振荡放电, 导致变压器励磁涌流判据闭锁差动保护。并分析了并联电容器振荡放电频率与电容器选型的关系, 其产生的谐波分量对变压器励磁涌流判据的影响。通过 EMTDC 进行了仿真研究, 提出了对变压器差动保护的励磁涌流判据的建议。

**关键词:** 变压器差动保护; 并联电容器; 励磁涌流; 谐振

**Abstract:** According to the slower operation of differential protection of internal fault in low voltage side of transformer, the reason is analyzed that the selection of serial reactor in the parallel capacitors leads to the oscillation discharge during the fault. And the transformer differential protection is blocked by transformer inrush criterion. Then the relationship between the oscillation discharge frequency of parallel capacitor and the type selection of capacitor is analyzed as well as the effects of harmonic component on transformer inrush criterion. Through the EMTDC simulation, the advices for the inrush current criteria of transformer differential protection are proposed.

**Key words:** transformer differential protection; parallel capacitor; inrush current; resonance

中图分类号: TM771 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0070-03

## 0 引言

并联电容器作为电网内主要的无功补偿装置已得到广泛应用, 保证了电网运行的电压质量。而为了消除系统谐波和限制合闸涌流, 电容器中往往串接电抗器。当并联电容器电源侧发生故障时, 会形成 RLC 串联回路对地放电, 当故障点位于变压器低压侧区内时, RLC 串联回路放电过程中所产生的暂态电流会流经变压器低压侧电流互感器, 从而使得变压器差动保护的差流中谐波含量上升。变压器差动保护中设有励磁涌流闭锁判据, 导致现场多次发生涌流闭锁判据误闭锁差动保护, 尤其对于高阻抗变压器, 低压侧短路时故障电流小, 受电容器放电回路的影响更大, 从而使变压器差动保护拒动或动作较慢的情况发生。

下面分析了电容器放电产生的谐振频率与并联电容器的选型关系, 其谐振谐波分量对变压器励磁涌流判据产生的影响, 并应用 EMTDC 进行了仿真,

提出了对变压器差动保护涌流判据的建议。

## 1 并联电容器侧放电电流的分析

额定电抗率为并联电容器中串联电抗器的感抗和电容器组容抗的比值, 即  $K = X_L / X_C$ , 若系统谐波以  $n$  次谐波为主, 则应选取串联电抗器感抗值  $X_L$  使得:  $(nX_L - X_C/n) > 0$ , 即  $K > 1/n^2$ , 例如当系统主要谐波为 5 次及以上谐波时,  $K > 4\%$ , 当系统主要谐波为 3 次谐波时  $K > 11\%$ 。考虑到 LC 抑制回路的谐振频率必须低于系统可能出现的最低次谐波频率以及低压并联电容器的容量在工作过程中会逐渐降低, 使谐振点往上漂移<sup>[3]</sup>, 所以为了取得一定的裕度, 对于 5 次及以上谐波, 取  $K > 6\%$ , 对于 3 次谐波, 取  $K > 12\%$ 。6% 和 12% 的电抗率也是目前并联电容器选型中最常用的电抗率, 工程上为了同时抑制上述谐波, 也可采用以上两种电抗率的电容器混用<sup>[2]</sup>。

如图 1 所示, 当系统 K1 点变压器低压侧区内

发生故障时,并联电容器对地形成RLC串联放电回路,其等值电路图如图2,由于并联电容器中电阻R很小,  $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ , 因此放电过程为振荡放电,放电电流表达式为

$$i = \frac{u_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (1)$$

其中,

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2; \delta = \frac{R}{2L}$$

当  $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$  时, 振荡频率为

$$\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{K} \quad (2)$$

若  $K = 6\%$ , 则振荡放电电流频率约为基波频率的4倍。

由此可以看到,变压器低压侧区内故障时,电容器振荡放电电流流过低压侧开关TA,计入变压器差动保护电流中,从而使差流中的谐波含量增大。

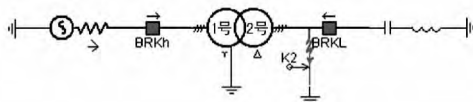


图1 系统接线图

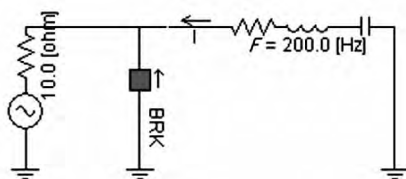


图2 故障时刻等值电路图

## 2 放电电流对变压器差动保护的影响

目前变压器保护应用鉴别励磁涌流的方法主要有2次谐波制动原理<sup>[1]</sup>和波形对称原理<sup>[4]</sup>。对于双重化配置的变压器保护,应使用不同原理的涌流识别判据,工程上的常规配置基本是一套使用2次谐波原理,一套使用波形对称原理。下面分别说明放电电流对两种涌流识别原理的影响。

### 2.1 对谐波制动原理的影响

谐波制动原理是根据励磁涌流中含有大量偶次谐波分量,其中又以2次谐波尤为明显,利用差流中2次谐波的含量来识别励磁涌流,

$$\frac{I_2}{I_1} = K_2 \quad (3)$$

式中  $I_1, I_2$  为差流中基波和2次谐波的幅值;  $K_2$  为2次谐波制动比的整定值。

同时为了防止变压器差动转角或滤零计算中造成的2次谐波降低,一些保护还增加了3次谐波闭锁功能。

$$\frac{I_3}{I_1} = K_3$$

式中  $I_1, I_3$  为差流中基波和3次谐波的幅值;  $K_3$  为3次谐波制动系数。

当并联电容器的放电振荡电流中含有大量2、3次谐波时,如并联电容器电抗率为  $K = 12\%$  时,变压器内部故障时,并联电容的振荡频率根据式(2)计算可知为  $\omega = 906.9 \text{ rad/s}$ ,这就增大差流中的3次谐波分量,可能造成谐波闭锁判据闭锁差动保护。

### 2.2 对波形对称涌流原理的影响

波形对称涌流原理是利用差流导数(即对差流采样点进行差分)的前半波与后半波进行对称比较,根据比较的结果去判断是否发生了励磁涌流,对于对称的定义为

$$K_W = \frac{|I'_d(t) + I'_d(t-2/T)|}{|I'_d(t) - I'_d(t-2/T)|} < K_{Set} \quad (5)$$

式中  $I'_d(t)$  为当前点差分后差流的数值;  $I'_d(t-2/T)$  为当前点前半波的差分后差流数值;  $K_{Set}$  为对称度门檻;  $K_W$  值越小,说明波形对称度高,连续判别半个周波,满足式(2)的对称的点数大于要求点数时,判别为内部故障,否则为励磁涌流。

将差流进行傅里叶级数展开得

$$I_d(t) = I_{d0} + \sum_{n=1}^N I_m(n) \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (6)$$

差流对时间  $t$  进行求导得

$$\begin{aligned} I'_d(t) &= n\omega \sum_{n=1}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n) \\ &= n\omega \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n) \\ &\quad + n\omega \sum_{n=2,4,6,8,\dots}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n) \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $I'_{d(odd)}(t) = n\omega \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n)$  为奇数频分量;  $I'_{d(even)}(t) = n\omega \sum_{n=2,4,6,8,\dots}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n)$  为偶数频分量。

由式(6)可知,对于差流导数中的奇数频分量为

$$I'_{d(odd)}(t) + I'_{d(even)}(t-2/T) = 0 \quad (8)$$

而偶数频分量为

$$I'_{d(even)}(t) - I'_{d(even)}(t - 2/T) = 0 \quad (9)$$

根据式(8)、式(9)可知差流中的偶次谐波分量会增大式(5)计算得到的对称  $K_w$  值,判为波形不对称,而奇次谐波分量通过式(5)计算的对称  $K_w$  为 0。可以看到波形对称原理实际上是将差流中的奇次谐波分量作为对称判别的动作量,而偶次谐波分量作为对称判别的制动量,奇次谐波含量越高则波形越对称,偶次谐波含量越高则波形越不对称。

当并联电容器的放电振荡频率为偶次谐波时,如并联电容器电抗率为  $K=6\%$  时,变压器内部故障时,并联电容的振荡频率根据式(2)计算可知  $\omega=1282.5 \text{ rad/s}$ ,这就增大了差流中的 4 次谐波分量,可能造成谐波闭锁判据闭锁差动保护。

### 3 试验仿真

使用 EMTDC 建立并联电容器的系统仿真模型,仿真系统如图 1,变压器高低侧短路阻抗为 65%,低压侧电容器容量为主变压器容量的 30%,模拟 K2 点三相故障,分别取 6% 和 12% 两种典型并联电容器电抗率进行仿真,研究对谐波制动原理和波形对称原理的影响。仿真步长为  $50 \mu\text{s}$ ,保护采样频率为 1 000 Hz。

#### 3.1 并联电容器电抗率为 6%

如表 1 所示,差流中 4 次谐波含量很高,其中 B 相 4 次谐波含量超过 30%。图 4、5、6 分别为 220~400 ms 时各采样时刻波形对称点数,在故障后 200 ms 内各采样时刻波形对称的点数均小于 5,波形对称将闭锁差动保护。

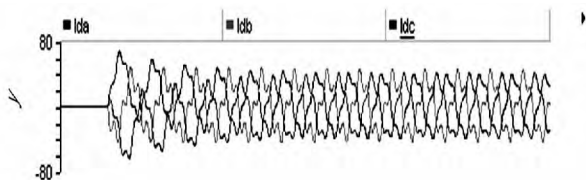


图 3 变压器低压侧故障差流波形(电抗率 6%)

#### 3.2 并联电抗器电抗率为 12%

如表 2 所示,差流中 3 次谐波含量很高,其中 B 相 3 次谐波含量超过 30%,目前变压器保护的谐波整定门槛基本在 15%~20% 之间,所以含有 3 次谐波制动的差动保护会延时动作甚至是拒动。

表 1 差流各次谐波含量

通道	基波	直流	2 次谐波	3 次谐波	4 次谐波
Ida	24.449A	7.597A	0.248A	0.160A	4.915A
		31.07%	1.02%	0.65%	20.10%
Idb	24.876A	0.410A	0.023A	0.032A	9.094A
		1.65%	0.09%	0.13%	36.56%
Idc	24.419A	8.007A	0.265A	0.176A	4.987A
		32.79%	1.09%	0.72%	20.42%

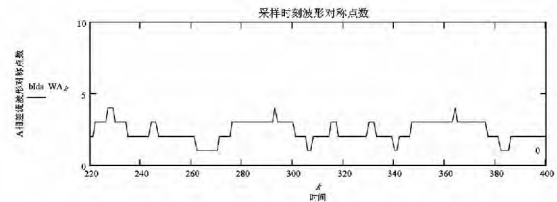


图 4 故障后 200 ms A 相差流波形对称点数(电抗率 6%)

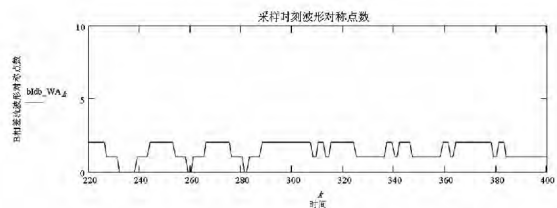


图 5 故障后 200 ms B 相差流波形对称点数(电抗率 6%)

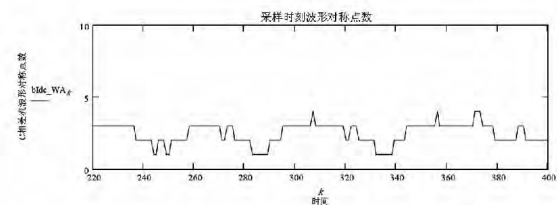


图 6 故障后 200 ms C 相差流波形对称点数(电抗率 6%)

波形对称分析如图 8、9、10,由于差流中奇次谐波含量很大,偶次谐波含量很小,因此各采样时刻的波形对称点数很多,电抗率为 12% 的并联电容器对波形对称原理并没有影响。

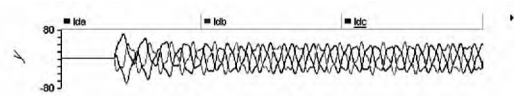


图 7 变压器低压侧故障差流波形(电抗率 12%)

表 2 差流各次谐波含量

通道	基波	直流	2 次谐波	3 次谐波	4 次谐波
Ida	23.791A	18.363A	0.515A	4.361A	0.641A
		77.19%	2.17%	18.33%	2.70%
Idb	24.753A	0.258A	0.826A	7.450A	0.805A
		1.04%	3.34%	30.10%	3.25%
Idc	23.747A	18.621A	1.098A	4.224A	0.242A
		78.41%	4.62%	17.79%	1.02%

(下转第 76 页)

(1): 242 - 246.

[8] Reshadi ,MMishra ,R. Dutt ,N. Instruction Set Compiled Simulation: A Technique for Fast and Flexible Instruction Set Simulation [C]. Design Automation Conference , Proceedings 2003: 758 - 763.

[9] 刘凤君. 现代逆变技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社 2006: 202 - 209.

[10] 许道飞. 基于 DSP 的在线式数字 UPS 数字控制技术 [D]. 杭州: 浙江大学 2003.

[11] 许爱国 ,谢少军. 电容电流瞬时值反馈控制逆变器的数字控制技术研究[J]. 中国电机工程学报 2005 25

(1): 49 - 53.

[12] 徐鹏飞. 太阳能光伏逆变器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2009.

[13] 熊娥. 光伏独立逆变电源的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学 2009.

[14] 冒波波. 微电网运行与控制的建模与仿真[D]. 成都: 西南交通大学 2012.

作者简介:

余 涛(1988), 硕士研究生, 研究方向为微电网运行控制技术。

(收稿日期: 2013 - 12 - 02)

(上接第 72 页)

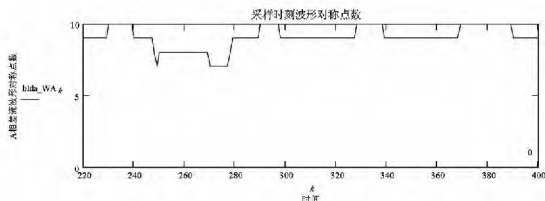


图 8 故障后 200 ms A 相差流波形对称点数 (电抗率 12%)

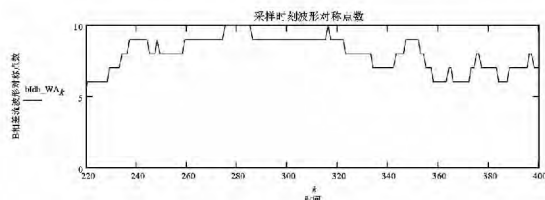


图 9 故障后 200 ms B 相差流波形对称点数 (电抗率 12%)

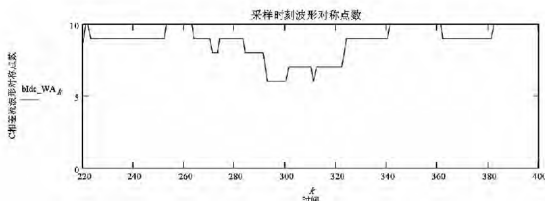


图 10 故障后 200 ms C 相差流波形对称点数 (电抗率 12%)

## 4 结 语

对并联电容器中电抗率选择、系统故障时放电电流对变压器保护的影响进行了分析, 得出了以下结论: ①并联电容器在系统故障时会形成振荡放电回路, 其振荡频率与电容器中电抗率有紧密的关系。②当变压器区内发生故障时, 并联电容器的放电电流会计入差流, 增大差流中的谐波含量。③放电电流会造成变压器保护尤其是高阻抗变压器保护中励磁涌流判别元件误闭锁差动保护, 导致差动保护延时动作甚至拒动。④考虑到 3 次谐波判据为 2 次谐波制动判据的补充辅助判据, 但在电容器 12% 电抗率情况下 3 次谐波会闭锁差动保护, 建议在判为区内故障时取消 3 次谐波闭锁, 只保留 2 次谐波闭锁, 防止差动保护拒动。⑤在电容器 6% 电抗率情况

下, 波形对称原理会闭锁差动保护, 建议在判为区内故障时采用滤波算法滤除差流中含有的 4 次谐波, 防止 4 次谐波增大而导致判为不对称, 防止差动保护拒动。

综上所述, 变压器保护必须考虑并联电容器放电电流的影响, 采取措施提高差动保护的可靠性。

## 参 考 文 献

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理及应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社 2001.

[2] 王志杰, 季美红. 低压并联电容器装置中串联电抗器的选用[J]. 电工电气 2009(8): 32 - 34.

[3] 洪贞贤. 减少谐波电流对补偿电容器影响的措施[J]. 电力电容器, 2007(5): 39 - 40.

[4] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1999(4): 42 - 46.

[5] 孙志杰, 曾献华, 汤汉松, 等. 磁通制动原理在变压器差动保护中的应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 160 - 164.

[6] 李贵存, 刘万顺, 腾林, 等. 基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别新算法[J]. 电力系统自动化, 2001 25(17): 25 - 28.

[7] 赵永彬, 卢毅. 主设备变压器保护谐波制动改进[J]. 电力自动化设备 2002 22(7): 1 - 5.

[8] 杨帆, 李晓明, 郑秀玉, 等. 电力系统分数次谐波的产生机理、危害与特征[J]. 高电压技术 2007 33(12): 153 - 156.

[9] 束洪春. 电力工程信号处理应用(第一版)[M]. 北京: 科学出版社 2009.

[10] 吴国沛, 刘育权, 任震. 电力系统谐波对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备 2007 22(7): 78 - 79.

作者简介:

陈 实(1985), 助理工程师, 硕士生在读, 主要从事电力系统继电保护的研究;

张 尧(1984), 助理工程师, 硕士生在读, 主要从事电力系统继电保护的研究;

郭 晓(1982), 工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护的研究。

(收稿日期: 2014 - 03 - 04)