

差动保护采用 P 级电流互感器的问题

朱声石

(国家电力公司电力自动化研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 分析了 P 级电流互感器的暂态误差, 提出抗暂态误差, 保证差动保护动作选择性的方法。

关键词: 保护用 P 级电流互感器; 差动保护

中图分类号: TM77; TM452

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)07-0004-04

1 引言

差动保护广泛作为电气主设备内部短路故障的主保护。从动作原理上讲是最好的。在外部短路的选择性首先取决于电流互感器对短路电流的正确变换, 在电流互感器的变换足够精确的基础上, 再辅以继电器的优良特性才能保证动作的选择性。历年保护动作统计表明差动保护正确动作率偏低, 从统计资料可见差动保护的误动作中除去运行不良造成的误动作外, 其他为不平衡电流造成的或原因不明。实际上归结为原因不明的误动作, 在事故后都对装置进行过认真的检查, 并且认为装置良好又将它投入运行。所以作者认为原因不明的误动作和不平衡电流造成的误动作一样也是因电流互感器的误差而且是暂态过程中的误差造成的。暂态误差决定于故障电流中暂态分量的大小, 决定于短路发生时稳态电流的初相角。因此这种误动作有“偶然”性, 事故后很难通过试验证明, 便归结为原因不明。有一种倾向亟待克服。这就是忽视电流互感器是继电保护系统的重要组成部分。不认真选择电流互感器的型号、技术数据及其二次负担, 在事故后只知道检验保护装置, 甚至故障录波已显示有很大的差动不平衡电流出现, 仍然认为是继电器的性能有缺陷, 本文将讨论这方面的问题。

2 电流互感器的误差

众所周知, 电流互感器的误差是由其励磁电流造成的, 图 1 是归算到二次侧的等值回路, 二次绕组的漏抗可以忽略。

由于微机保护的功耗很小, 电流互感器的二次负担, 主要决定于二次电缆。所以图中二次回路的电阻 R_2 由互感器绕组电阻 R_w 和电缆电阻 R_b 组成, $R_2 = R_w + R_b$ 。忽略铁损励磁阻抗为纯电抗, L_m 是其电感。长期以来, 在差动保护的整定计算中都

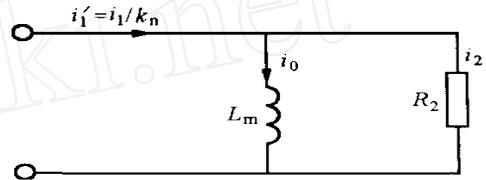


图 1 电流互感器等值回路

忽略角差, 仅按制造厂提供的 10% 误差曲线估计比差。作者在文献^[3]中推荐的通用特性也忽略角差, 都是不正确的。按国际统一定义, 互感器的复合误差为

$$c = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_n i_2 - i_1)^2 dt} \quad (1)$$

式中 $k_n i_2 - i_1$ 就是励磁电流的瞬时值 i_0 , 忽略谐波分量上式根号内的值就是励磁电流的有效值。从图 1 的等值回路可见 c 代表的误差电流与 i_2 相位相差 90° , 所以 I_1 和 I_2 的相位差不可忽视。误差大时尤其不可忽视。

现代差动保护的動作时间约为 20ms。因此必需研究电流互感器的暂态响应。短路电流中的非周期分量是使电流互感器的暂态传变特性变坏的首要因素。因此假设一次电流含有最大的非周期分量, 即

$$i_1 = I_m (e^{-\frac{t}{T_1}} - \cos t)$$

式中 T_1 为一次电流非周期分量衰减的时间常数, 在电流互感器未饱和时其励磁电感 L_m 可以认为是常数。于是图 1 的电路是线性的可解得 i_0 近似为

$$i_0 = I_m \frac{T_1}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) - \frac{L_m}{T_2} \sin t \quad (2)$$

可见励磁电流含有 3 个分量。1, 稳态周期分量; 2, 按一次时间常数 T_1 衰减的非周期分量; 3, 按二次时间常数 $T_2 = \frac{L_m}{R_2}$ 衰减的非周期分量。暂态过程中的

i_0 与稳态分量最大值之比为

$$K_{fj} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) - \sin t$$

K_{fj} 称为暂态标定因素或饱和系数。假设上式中非周期分量为最大值时 $\sin t = -1$, 则可求得 K_{fj} 的最大值^[1]为

$$K_{fj\max} = T_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \frac{T_1}{T_2 - T_1} + 1 \right) \quad (3)$$

假设 $T_2 = (1 \sim 2) s$, 则 $K_{fj\max}$ 在不同 T_1 下的值如下表所示

T_1	10ms	50ms	300ms
$K_{fj\max}$	4 ~ 4.1	14.4 ~ 15.3	56.6 ~ 67.4

可见 T_1 对 K_{fj} 影响最大。电流互感器对非周期分量传变较对周期分量的传变差。因此励磁电流中的非周期分量比周期分量大得多。这是 K_{fj} 增大的根本原因。 T_1 越大, 一次电流的非周期分量越像直流, 非周期分量传变得越差。 $K_{fj\max}$ 越大。

因此如果电流互感器仅稳态误差满足准确级的要求, 并在差动保护的整定计算中引入一个非周期分量系数 $K_{ap} = 2$, 难免会在某些不利的情况下失去选择性。

3 保证差动保护动作选择性的方法

电流互感器在暂态过程中的误差比稳态误差大得多, 保证差动保护在外部短路时动作的选择性应采取以下的方法。

3.1 在选择电流互感器时应引入暂态标定因素 $K_{fj\max}$

按式(1)规定的复合误差是稳态短路电流下的误差^[2], 例如 50VA10P20 的 P 级互感器的复合误差是在二次输出为 50VA 一次稳态电流为 20 倍额定电流(20 为准确限额系数 K_{ssc}) 时误差不超过 10%。前面分析说明暂态励磁电流比稳态值增大 $K_{fj\max}$ 倍, 因此如果把稳态下满足 10% 误差的标准增大 $K_{fj\max}$ 倍就可满足暂态下复合误差不超过 10%。这就是将二次额定输出或准确限额值系数增大 $K_{fj\max}$ 倍或者两者同时增大, 总共增大 $K_{fj\max}$ 倍。

对于二次额定电流 I_{2n} 为 5A 的电流互感器, 如果变比不变, 引入 $K_{fj\max}$ 后铁心截面要相应地增大, 在经济上变得不合理, 出路是选择 $I_{2n} = 1A$ 的互感器。如果型号相同, 例如 LB110 型, $I_{2n} = 5A$ 额定输出 S_{2n} 为 50VA, 若 $I_{2n} = 1A$ 则 $S_{2n} = 30VA$, 也就是说二次电缆的电阻可以由 $R_b = 2$ 增加到 30。如果电阻不变, 允许的准确限额电流可增大 15 倍。

3.2 二次负担匹配

差动保护的差动不平衡电流决定于两侧电流互感器的相对误差而不是单个电流互感器的误差, 因此只要两侧电流互感器的负担能匹配就可大大降低差动不平衡电流。长期以来在整定差动继电器时都引入同型系数 K_{cc} 就是从这一观点出发的, 但是对 K_{cc} 的取值过于粗略, 甚至可以说缺乏科学依据。

发电机完全差动保护, 发电机将一相分支为偶数的裂相横联差动保护以及 $1/2$ 断路器母线的线根保护(流行的名称是短引线保护, 作者认为短引线从字义上会误解为一条很短的线路, 是不恰当的。它实际是输电线路的一部分, 在输电线路停电时残留在母线上的, 称为线根或残根意义更确切, 也符合外语 Stub Protection) 都只有两组电流互感器而且型号和变比都相同。在这种情况下只要二次电缆的长度和截面相同, 那么除了铁心中的剩磁可能有差异外, 在外部短路时两侧电流互感器的特性和工况完全相同。如果剩磁也相同, 理论上在任何情况下包括在暂态过程中差动不平衡电流永为零。

发电机完全差动保护和横差保护只会在发生内部短路后和在电流互感器二次绕组通电流做试验后忘记消磁才会残留方向不同的剩磁。发电机完全差动保护为了把引出线包含在其保护范围以内, 其机端电流互感器可能置于较远的地方, 从而造成其二次电缆的长度大大超过中性点侧电流互感器的二次电缆的长度。此时可采取增加机端侧电缆截面的方法使两侧电流互感器的二次负担平衡。我国某水电站中有两台机采取加长中性点侧电缆长度的方法与机端相等, 已运行了六十余年。前廿余年采用的机械型比率差动继电器制动系数整定为 0.2, 没有任何抗暂态误差的措施, 其动作的选择性也得到保证。发电机横差保护和线根保护的两组电流互感器靠得很近, 使它们的二次电缆长度相等是非常容易的。最好在端子箱处就将两侧的电流互感器二次差接起来, 这样在引入保护屏的电缆上流过的是差动电流。如此接法把每一电流互感器的负担 R_b 几乎降低到零又相互平衡, 差动保护的选择性绝对没有问题。

如果两侧电流互感器的型号和变化都不相同, 如发电机不完全差动保护, 发电机一相分支数为奇数时的横差保护以及变压器保护等则很难做到完全平衡。以发电机不完全差动保护为例, 如果两侧电流互感器的变比相同, 则在外部短路时两侧电流互感器的过电流倍数不相同, 机端电流互感器更易饱

和。如果两侧电流互感器的变比与其一次所包含的分支数成比例,则在正常运行时两侧二次输出电流相等。因为在二次负担相等的条件下铁心中的磁通与变比成反比,在外部短路时中性点侧电流互感器易饱和。此时可对两侧电流互感器的二次负担进行匹配,以降低外部短路时的不平衡电流。

电流互感器进行二次负担匹配的方法如下:

1) 按磁化曲线进行匹配

由磁化曲线可以找到饱和电压 U_X , U_X 是用折线代替磁化曲线时折线上拐点的电压,匹配的条件是两侧的 $\frac{U_X}{I_{2N}(R_W + R_b)}$ 相等。其中 R_W 和 R_b 分别为二次绕组和电缆的电阻, I_{2N} 为电流互感器的二次额定电流。实际电流互感器的一次额定电流都大于被保护设备的额定电流,所以当被保护设备满负荷运行时电流互感器二次实际流过的电流为 I_{2N} , ($0 < < 1$)。

2) 按 10% 误差曲线进行匹配

假设电流互感器的二次额定输出为 S_{2N} , 从 10% 误差曲线上可查到相应的准确限值系数 K_{ssc} , 则可估算出 $U_X = K_{ssc} \frac{S_{2N}}{I_{2N}}$ 。得到 U_X 后即可按 1 项中的方法进行匹配。

3) 按 P 级电流互感器的技术数据进行匹配。

假设其数据为 50VA10P20 就可近似认为 $U_X = \frac{50 \times 20}{I_{2N}}$ 。再按上面介绍的方法进行匹配。

匹配时尽量采取减少一侧的 R_b , 这样可提高电流互感器的精确度。如果改变变比要注意 U_X 和 I_{2N} 会同时改变。

变压器差动保护两侧电流互感器的型号和变比相差很大。在一次侧流过额定功率时两侧电流互感器的二次电流都不可能是额定值 I_{2N} , 需计算出实际电流 I_{2N} 进行匹配。如果为了校正 Y,d 接线变压器两侧电流的相位差, 将电流互感器二次按三角形连接, 则 R_b 应增大为 $3R_b$ 。

三绕组变压器若只有一侧有电源, 在外部短路时仅两侧流过穿越性短路电流, 二次负担匹配的方法与双绕组变压器同。如果两侧有电源, 例如 220/110/10kV 的三绕组变压器在 220kV 和 110kV 两侧都有电源, 在 220kV 侧或 110kV 侧外部短路时 10kV 侧都没有短路电流流过。所以 220kV 侧和 110kV 侧电流互感器二次负担的匹配和双绕组变压器同。在 10kV 侧外部短路时 220kV 和 110kV 两侧电源都提

供短路电流, 两侧提供短路电流的比例也不是固定, 无法保证三侧电流互感器同时进入饱和区, 所以只能将 10kV 侧的电流互感器的 S_{2N} 和 K_{ssc} 选择得更大一些, 对运行中的设备使二次负担 R_b 更小一些。如果 10kV 侧没有电源或只有小电源可以采取在 10kV 侧流过很大电流时闭锁差动保护。对于微机型保护是很容易做到的。

一般 10kV 的电流互感器比 220kV 的饱和倍数要低, 某系统一台 220kV/10kV 的双绕组变压器非但没有减轻 10kV 电流互感器的实际二次负担, 反而在 220kV 侧将二组电流互感器的二次绕组串联使用, 使之好上加好, 增长了相对误差终于在外部短路时失去选择性。正是没有二次负担需要匹配的思想, 造成了失误。

3.3 提高差动继电器的制动系数

习惯地按避开外部短路的不平衡电流最大限度地降低制动系数以获得在内部短路时的高灵敏度, 作者认为应反其道而行之。由于比率制动判据在内部短路时容易满足, 可以最大限度地提高制动系数, 使得在外部短路时能容忍最大不平衡电流。这个建议已在文献^[4]中提出, 并在文献^[3]中推荐比率差动的通用特性。但遗憾的是在讨论外部短路的不平衡电流时只考虑比差, 忽略了角差。本文借此机会予以纠正。从图 1 电流互感器的等值回路可见励磁电流 i_0 与二次电流 i_2 相位相差 90° 。提高制动系数既然是为了防止可能出现的大误差, 那末 i_2 和 i_1 之间的相位差就不应忽略。因为误差电流 I_1 等于励磁电流 I_0 , 所以二次电流 $I_2 = I_1 \cos \sin^{-1}$ 。

比率差动继电器的差动电流 $I_d = \left| \sum_{i=1}^n i_i \right|$ 其中 n 为被保护设备引出线的数目。制动电流取为 $I_{res} = \sum_{i=1}^n I_i$ 。在分析外部短路时习惯取最严重条件。即所有健全引线上的电流互感器都无误差。它们二次电流之和为 I_1 , 故障引线电流互感器的误差最大。差动保护的不平衡电流等于故障引线电流互感器的励磁电流, $I_d = |I_1 + I_2| = I_1$, 而制动电流 $I_{res} = I_1 + I_2 = I_1(1 + \cos \sin^{-1})$ 。

比率制动判据有两种, 分别讨论如下:

制动判据一: $I_d - m I_{res} > 0$

将上述 I_d 和 I_{res} 之值代入后得

$$m(1 + \cos \sin^{-1})$$

对此超越函数方程的求解只能用试探方法。令 $m = 0.5$, 不难求得 0.8 时制动判据一满足。

制动判据二： $I_d - mI_{res} + 2mI_n - I_{d0} = 0$

假设取 $I_{d0} = 0.2I_n$, 和判据一相同令 $m = 0.5$, 再将 I_d 和 I_{res} 之值代入后得

$$0.5(1 + \cos \sin^{-1}) - \frac{0.8I_n}{I_1}$$

时制动判据二满足。由上式可见 与 I_1/I_n 有关, 对于不同的 I_1/I_d 之值用试探法可求得相应的 值如下表

I_1/I_n	1.2	2	5	10	15	20	50
	0.31	0.53	0.70	0.75	0.767	0.776	0.79

这里纠正了文献^[3]的疏忽, 考虑了 I_1 和 I_2 的相位差使制动特性斜率降低为 $m = 0.5$, 使得在内部短路时各侧供给的短路电流允许有更大的相位差, 保护的灵敏性得到提高。

顺便指出, 变压器差动保护除了电流互感器的误差外还有变压器调压引起的误差, 和电流互感器变比不符合理想值引起的误差 (此项误差在微机保护中可通过软件消除), 但后两者与电流互感器的误差相比不仅数值小而且相位接近 90° 。在制动系统提高以后再在整定计算时引入后两项误差已无实际意义。所以这里推荐的制动特性是通用的。

上述三种提高差动保护选择性的方法是并行不悖的, 应当同时采用。

母线差动保护的特点是引线多, 电源多, 在外部短路时流经故障引出线的电流很大, 可能达到电流互感器的额定电流的 30 倍以上, 而且一次系统的时间常数很大, 所以故障引线的电流互感器将工作在

深饱和区, L_m 不再是常数, 前面的分析方法不再适用。电流互感器的二次负担也无法匹配。保证母线差动保护选择性的方法超出本文讨论的范围。

4 结论

差动保护采用 P 级电流互感器在经济上是合理的。在技术上为了保证差动保护动作的选择性, 在选择电流互感器的二次额定输出功率和准确限值系数时应引入暂态标定因素 K_{fmax} 尽可能减少暂态误差。二次负担应进行匹配以减少两侧电流互感器之间的相对误差, 降低差动不平衡电流, 最后提高比率差动继电器的制动系数, 以提高抗差动不平衡电流的能力。采用这些措施后差动保护的选择性是可以保证的。

参考文献:

- [1] 王梅义. 电网继电保护应用. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 王维俭, 李英. 纵联差动保护原因不明误动作的分析和对策. 电力系统自动化, 1999(18): 17~19.
- [3] 朱声石. 数字式比率差动继电器的通用特性. 电力系统自动化, 1999(11): 6~9.
- [4] 朱声石. 关于数字式比率差动继电器. 电力自动化设备, 1998(1): 7~10.

收稿日期: 2000-02-28

作者简介: 朱声石 (1929 -), 男, 教授级高工, 长期从事电力系统继电保护的研究。

Differential protection using class p current transformer

ZHU Sheng-shi

(Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The transient error of class P current transformer is analyzed. Measures for ensuring the selective operation of the differential protection against the transient error of the current transformer are offered.

Keyword: class P current transformer; differential protection

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告