

核电厂变压器零序差动保护配置及其整定计算

谢创树

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 百万核电机组的主变压器通常由 3 台 500 kV 单相变压器构成, 单相接地故障是其主要故障型式之一, 零序电流差动保护是针对单相接地故障的主保护。目前可供选用的零序电流差动保护装置的保护原理主要是比例制动式差动保护, 在技术细节上仍存差异, 保护整定计算方法不同, 对电流互感器的配置适应性也不同。针对两类不同的零序电流差动保护原理, 并分析其适应的不同情况, 提出核电厂主变压器零序电流差动保护设计方案及其保护整定计算方法。

关键词: 核电厂; 变压器; 零序差动保护; 电流互感器; 整定计算

中图分类号: TL361 文献标志码: A 文章编号: 2095-8676(2015)04-0074-07

Design and Setting of Zero-sequence Current Differential Protection for Transformers in Nuclear Power Plants

XIE Chuangshu

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: 1 000 MW nuclear power unit's main transformer usually consists of three 500 kV single-phase transformers, single-phase ground fault is one of the main fault types, and zero-sequence current differential protection is the main protection against single-phase ground fault. Currently the protection principle for zero-sequence current differential protection device is mainly rate restraint differential protection, however, the differences still exists between technical details, the calculation methods for protection settings and the adaptabilities to the current transformer configuration are also different. In this paper, considering two different types of zero-sequence current differential protection principle, by analyzing the different situations they adopt to, it proposed a design of nuclear power plant main transformer's zero-sequence current differential protection and its protection setting calculation

Key words: nuclear power plant; transformer; zero-sequence current differential protection; current transformer; setting calculation

二代加和三代压水堆核电厂发电机额定功率不小于 1 000 MW, 其升压变压器通常由 3 台 500 kV 单相式双绕组变压器构成, 接线组别为 $Y_N d_{11}$ 。变压器单相接地故障是其主要故障形式之一, 所配置的纵联差动保护主要反映相间短路故障, 相间差动保护不反映单相短路最具特色的零序电流^[1]。《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》(DL/T 684—2012)指出, 变压器纵联差动保护启动值: 在工程实用整定计算中可选取为 0.3~0.6 倍的变压器额定电流^[2]。这样的定值虽然解决了纵联差动保

护的可靠性和灵敏性的矛盾, 但是对于变压器中性点附近的轻微接地故障, 就不能满足灵敏度的要求。在《核电厂常规岛设计规范》(GB/T 50958—2013)中提出: 中性点直接接地运行的 500 kV 变压器应装设零序差动保护^[3], 反映变压器单相接地短路故障的主保护。零序差动保护原则上与励磁涌流无直接关系, 对单相接地短路灵敏度高, 有很大的技术优越性^[4]。那么核电厂的变压器零序差动保护方案应如何设计和整定计算, 值得我们关注。

1 零序差动保护配置及其特点

零序差动保护作为核电厂升压变压器接地故障的主保护, 其设计方案受变压器的结构、保护装置的保护原理以及电流互感器配置等的影响。

变压器零序差动保护配置应根据变压器的结构

特点进行配置。由 3 台单相变压器构成双绕组变压器，每一个绕组均有两个引出端，方便构成不同接线组别。下面阐述零序差动保护的三种典型配置及其接线方案。

1.1 电流互感器配置方案一

3 台单相变压器 500 kV 侧的三相绕组接成 Y_N ，每一相的出线端配置 1 组单相电流互感器，把 3 组单相电流互感器接成 Y 型；单相变压器每一相的另一出线端接成共点构成中性点接地，然后在中性点侧配置 1 组零序电流互感器。这种方式要求保护装置应具有 4 路模拟量共 6 个输入接线端。如图 1 所示。

变压器 500 kV 侧出线端的零序电流 ($3I_{0h}$) 为 3 组单相电流互感器输出的二次电流向量和：

$$3I_{0h} = I_{a1} + I_{b1} + I_{c1} \quad (1)$$

变压器中性点侧的零序电流 ($3I_{0n}$) 就是零序电流互感器直接输出的二次电流 ($3I'_0$)：

$$3I_{0n} = 3I'_0 \quad (2)$$

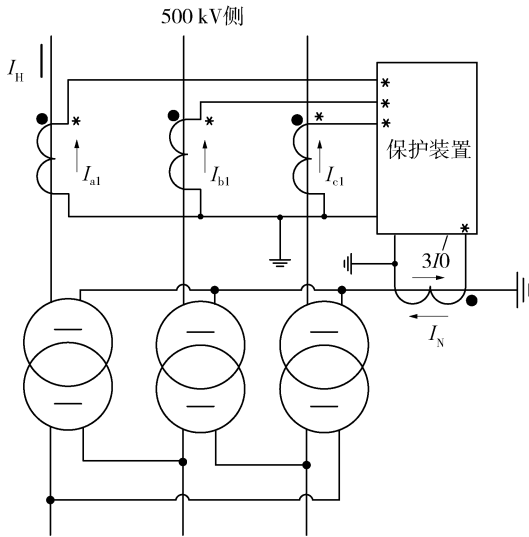


图 1 零序差动保护电流互感器配置及其接线之一

Fig. 1 The First One Configuration of Current Transformers for Zero-Sequence Current Differential Protection and the Connection

1.2 电流互感器配置方案二

3 台单相变压器 500 kV 侧的三相绕组接成 Y_N ，每一相的出线端配置 1 组单相电流互感器，把 3 组单相电流互感器接成 Y 型；单相变压器每一相的另一出线端也各配置 1 组单相电流互感器，同样地把 3 组单相电流互感器接成 Y 型，然后把 3 台单相变压器出线端接成共点构成中性点接地。这种方式要

求保护装置应具有 6 路模拟量共 8 个输入接线端。如图 2 所示。

变压器 500 kV 侧出线端的零序电流 $3I_{0h}$ 为 3 组单相电流互感器输出的二次电流向量和：

$$3I_{0h} = I_{a1} + I_{b1} + I_{c1} \quad (3)$$

变压器中性点侧的零序电流 $3I_{0n}$ 为 3 台单相变压器绕组另一出线端的电流互感器输出的二次电流向量和，即三相电流进入装置求向量和：

$$3I_{0n} = I'_{a1} + I'_{b1} + I'_{c1} \quad (4)$$

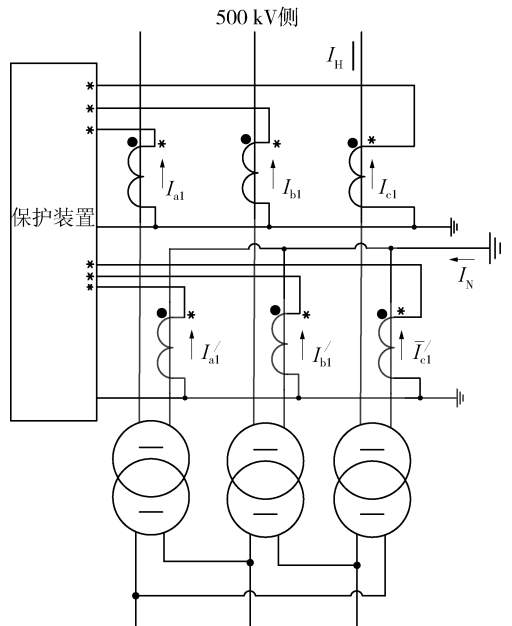


图 2 零序差动保护电流互感器配置及其接线之二

Fig. 2 The Second One Configuration of Current Transformers for Zero-Sequence Current Differential Protection and the Connection

1.3 电流互感器配置方案三

3 台单相变压器 500 kV 侧的三相绕组接成 Y_N ，每一相的出线端配置 1 组单相电流互感器，把 3 组单相电流互感器接成 Y 型；单相变压器每一相的另一出线端也各配置 1 组单相电流互感器，把 3 组单相电流互感器的同极性端并接，构成零序过滤器，然后把 3 台单相变压器出线端接成共点构成中性点接地。这种方式要求保护装置应具有 4 路模拟量 6 个输入接线端，如图 3 所示。

变压器 500 kV 侧出线端的零序电流 $3I_{0h}$ 为 3 组单相电流互感器输出的二次电流向量和：

$$3I_{0h} = I_{a1} + I_{b1} + I_{c1} \quad (5)$$

变压器中性点侧的零序电流 $3I_{0n}$ 为 3 台单相变压器绕组另一侧的电流互感器输出的二次电流向量

和, 即三相电流通过零序过滤器后输入装置:

$$3I_{0n} = I'_{a1} + I'_{b1} + I'_{c1} \quad (6)$$

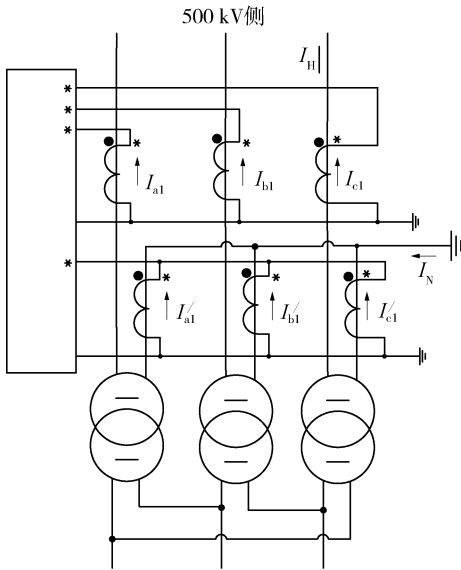


图3 零序差动保护电流互感器配置及其接线之三

Fig. 3 The Third One Configuration of Current Transformers

for Zero-Sequence Current Differential Protection and the Connection

2 比例制动式零序差动保护

比例制动式零序差动保护原理遵循基尔霍夫电流定律, 不存在磁路问题, 不受励磁涌流影响。因此, 微机型零序差动保护装置都采用比例制动式零序差动保护原理, 但不同的产品仍然存在细微的差异。根据保护原理的差异, 目前可供选用的微机型零序差动保护装置可分为两种类型: 一种是传统向量和(或差)的比例制动式零序差动保护, 另一种是类似向量积的比例制动式零序差动保护。国内的产品都属于前者, 国外的产品则两者都有。

对于向量和(或差)的动作方程如下四种方式。

2.1 零序差动保护动作方程之一

$$I_{0.op} \geq I_{0.set} \quad (7)$$

$$I_{0.op} \geq K_{0.sl} I_{0.res} \quad (8)$$

$$I_{0.res} = \max\{|3I_{0h}|, |3I_{0n}|\} \quad (9)$$

$$I_{0.op} = |3I_{0h} - 3I_{0n}| \quad (10)$$

式中: $I_{0.op}$ 为零序差动动作电流; $I_{0.set}$ 为零序差动保护动作电流设定值; $I_{0.res}$ 为零序制动电流; $K_{0.sl}$ 为零序差动比例制动系数。

2.2 零序差动保护动作方程之二

$$I_{0.op} \geq I_{0.set} \quad (11)$$

$$I_{0.op} \geq I_{0.set} + K_{0.sl}(I_{0.res} - I_{0.res0}) \quad (12)$$

$$I_{0.res} = \max\{|I_a|, |I_b|, |I_c|\} \quad (13)$$

$$I_{0.op} = |3I_{0h} + 3I_{0n}| \quad (14)$$

式中: $I_{0.res0}$ 为零序制动电流起始值; I_a 、 I_b 、 I_c 为变压器高压侧三相电流二次值。

2.3 零序差动保护动作方程之三

$$I_{0.op} \geq I_{0.set} \quad (15)$$

$$I_{0.op} \geq I_{0.set} + K_{0.sl}(I_{0.res} - I_{0.res0}) \quad (16)$$

$$I_{0.res} = \max\{|3I_{0h}|, |3I_{0n}|\} \quad (17)$$

$$I_{0.op} = |3I_{0h} + 3I_{0n}| \quad (18)$$

式中各量的意义同上述。

2.4 零序差动保护动作方程之四

$$I_{0.op} = |3I_{0h} + 3I_{0n}| \quad (19)$$

$$I_{0.res} = \max\{I_{R1}, I_{R2}, I_{R0}\} \quad (20)$$

$$I_{0.op} \geq I_{0.set} \quad (21)$$

$$I_{0.op} \geq K_{0.sl} I_{0.res} \quad (22)$$

式中:

$$I_{R0} = |3I_{0n} - 3I_{0h}| \quad (23)$$

$$I_{R2} = |I_2| \text{ or } I_{R2} = 3|I_2| \quad (24)$$

在上面 I_{R2} 式子中, 乘数 1 针对变压器绕组完全卸载后起初两周波的保护, 乘数 3 用于正常运算, 即变压器绕组加载后两周波, 为确保足够的灵敏度, 低乘数常用于变压器故障绕组加载时。

I_{R1} 的取法如下:

If $|I_1| > 1.5pu$ of phase CT, then

If $|I_1| > |I_0|$, then $I_{R1} = 3(|I_1| - |I_0|)$

else $I_{R1} = 0$, else $I_{R1} = \frac{|I_1|}{8}$

在低负荷电流时(低于 150% 额定电流), 正序制动电流设为 1/8 正序电流, 确保变压器满载低电流故障期间具有最大灵敏度; 低故障电流(大于 150% 额定电流), 如果零序电流大于正序电流, 则取消正序制动电流, 否则设为正序电流与零序电流之差的 3 倍。

上述三类动作方程的共同点: 零序差动保护动作电流均为出线端的零序电流 $3I_{0h}$ 为与中性点侧的零序电流 $3I_{0n}$ 的向量差或者向量和, 之间的差异是比例制动特性不同, 制动电流的取法不一样, 取两侧电流中的较大者、或取三相电流中的最大者。对于接线方案一, 若发生区外相间故障, 则中性点电流互感器无电流, 而引出侧三相电流互感器自产的零序电流可能较大, 相似于内部接地故障而导致误

动^[5]。而接线方案二和三则不然。可见这类比例制动特性的零序差动保护原理不适应于上述接线方案一，适应于接线方案二和三。

2.5 零序差动保护动作方程五

其跳闸动作电流仅取决于变压器中性点侧的零序电流 $3I_{0n}$ ，就是零序电流互感器直接输出的二次电流 $3I'_0$ ：

$$I_{0.op} \geq I_{0.set}, I_{0.op} = |3I_{0n}| \quad (25)$$

制动电流：

$$I_{0.res} = K_{0.res.ins} (|3I_{0n} - 3I_{0h}| + |3I_{0n} + 3I_{0h}|) \quad (26)$$

式中： $K_{0.res.ins}$ 为保护装置内部的零序差动保护制动系数，可以用于改变制动量的大小，不同装置其系数不同。

1) 区内单相接地故障时，仅从中性点汲出的零序电流 $3I_{0n}$ ，此时跳闸电流：

$$I_{0.op} \geq I_{0.set}, I_{0.op} = |3I_{0n}| \quad (27)$$

制动电流：

$$I_{0.res} = 0 \quad (28)$$

2) 区内单相接地故障时，从中性点汲出和系统馈入的零序电流，为了分析方便，假设两者幅值相等，即 $3I_{0h} = 3I_{0n}$ ，此时跳闸电流：

$$I_{0.op} \geq I_{0.set}, I_{0.op} = |3I_{0n}| \quad (29)$$

制动电流：

$$I_{0.res} = -2K_{0.res} |3I_{0n}| \quad (34)$$

3) 区外单相接地故障时， $3I_{0h}$ 与 $3I_{0n}$ 方向相反，幅值相等，即 $3I_{0h} = -3I_{0n}$ ，此时跳闸电流：

$$I_{0.op} \geq I_{0.set}, I_{0.op} = |3I_{0n}| \quad (35)$$

制动电流：

$$I_{0.res} = 2K_{0.res} |3I_{0n}| \quad (36)$$

实际上， $3I_{0h}$ 与 $3I_{0n}$ 之间存在相位差 φ 。如果相位差在 0° 和 90° 之间，属于区内单相接地故障时，保护特性落在基本跳闸特性区域内，制动电流为零或负值则无制动作用，只要跳闸电流 $I_{0.op}$ 大于或等于 $I_{0.set}$ ，保护就可靠跳闸。如果相位差在 90° 和 180° 之间，该装置设定了限制角为 100° ，相位差小于 100° 时，则保护在扩展跳闸特性区域内，保护能可靠跳闸；相位差大于或等于 100° 时，则保护在扩展跳闸特性区域外，即使零序电流差动保护区外单相接地故障电流穿越中性点侧零序电流互感器致其饱和，保护也能可靠不动，因这动作特性已经远离跳闸动作特性区。

这类比例制动特性的零序差动保护原理适应于上述接线方案一。

3 零序差动保护电流互感器选择

零序差动保护电流互感器的选择和纵联差动保护的一样应遵守：保护区内故障时电流互感器误差不会影响保护可靠动作，保护区外最严重故障时电流互感器误差不致保护误动。

3.1 确定电流互感器变比

根据变压器的容量、电压等级初步确定变压器接地绕组引出线端的电流互感器一次绕组额定电流及变比。据此，近几年运行的和在建的核电厂 500 kV 变压器接地绕组引出线端的电流互感器配置情况，如表 1。

表 1 核电厂变压器 500 kV 引出线端的电流互感器配置
Table 1 The Current Transformer Configuration for Main Transformer Exit at Level 500 kV in Nuclear Power Plant

核电厂名称	变压器容量/MVA	电压(kV)	接线组别	500kV引出线端初选电流互感器变比
Li	1 200	525 kV / 24 kV	YnD11	2 000/1
Ni	1 200	535kV / 24 kV	YnD11	4 000/1
Ho	1 260	535 kV / 24 kV	YnD11	2 000/1
Ya	1 200	525 kV / 24 kV	YnD11	2 000/1
Ta	2 100	525 kV / 27 kV	YnD11	2 500/1
Lu	1 440	525 kV / 24 kV	YnD11	2 000/1

3.2 确定电流互感器的类型

电流互感器的励磁特性为非线性的磁滞回线，在短路电流含有非周期分量的暂态过程中，因大机组一次时间常数较大，可能使其严重饱和而产生大的暂态误差。因此，300 kV 及以上系统保护、高压侧为 330 kV 及以上的变压器和 300 MW 及以上的发电机变压器组差动保护用电流互感器宜采用 TPY 电流互感器^[6]。如经过计算论证可行，也可同选为 5P 电流互感器，使之成为统一的 TPY 或统一的 5P (5PR)^[7]，保证在实际工作循环中不致暂态饱和，即暂态误差不超过规定值^[8]。

3.3 验证所选的电流互感器

根据系统在最大运行方式下的短路电流计算结果验证所选的电流互感器一次绕组额定值的合适性。保护区外最严重故障时穿越电流互感器的故障电流不应致其饱和，暂态饱和出现的时间至少不小

于 5 ms, 且未达饱和状态时的暂态误差不应超过限值 10%^[8]。同时应注意, 变压器接地绕组引出线端的电流互感器通常为纵联差动保护和零序差动保护共用, 必须同时满足两种差动保护的要求。

按照《电流互感器和电压互感器选择及计算导则》(DL/T 866—2004), 并根据短路电流计算结果验证所选电流互感器。下面列举近几年工程的短路电流计算情况, 当工程第一台机组投入运行, 其计算结果如表 2 所示; 当工程的所有机组投入运行, 其计算结果如表 3 所示。

表 2 在系统大方式下 1 台机组运行时 500 kV 侧短路电流

Table 2 Short-circuit Current at Level 500 kV When Power System in Maximum and Nuclear Power Plant Only One Unit Service

核电厂名称	500 kV 母线三相短路		500 kV 母线单相接地短路	
	1 号机组所馈的短路电流/kA	系统所馈的短路电流/kA	1 号变压器汲出的短路电流/kA	系统所馈的短路电流/kA
Li	4.23	37.91	13.94	19.61
Ni	4.11	12.44	8.62	7.93
Ho	4.47	20.25	12.02	10.79
Ya	3.43	12.51	10.18	4.26
Ta	6.05	22.41	14.72	8.21
Lu	3.55	37.91	13.20	19.68

3.4 确定中性点侧的电流互感器

为了避免因电流互感器暂态性能不一致而导致零序差动保护误动, 保护两侧的电流互感器应保证类型一致, 变比相同。根据这配置原则确定了变压器中性点侧零序电流互感器, 电流互感器的验证方法同上述。近几年部分核电厂变压器零序电流互感器配置情况见表 4。

表 3 在系统大方式下厂内所有机组运行时 500 kV 侧的短路电流

Table 3 Short-circuit Current at Level 500 kV When Power System in Maximum and Nuclear Power Plant Only All Unit Service

核电厂名称	500 kV 母线三相短路			500 kV 母线单相接地短路			500 kV 变压器 低压侧三相短路
	1 号机组所馈的短路电流/kA	系统所馈的短路电流/kA	其它机组所馈的短路电流/kA	1 号变压器汲出的短路电流/kA	系统所馈的短路电流/kA	其它机组所馈的短路电流/kA	系统和其它机组所馈的短路电流/kA
Li	4.23	37.91	12.23	10.22	14.37	29.92	8.26
Ni	4.11	12.44	12.32	6.55	6.03	19.65	6.39
Ho	4.47	20.25	13.42	8.5	7.63	25.5	7.95
Ya	3.43	12.51	10.29	6.61	2.77	19.84	6.21
Ta	6.05	22.41	6.05	11.61	6.48	15.61	9.46
Lu	3.55	37.91	10.65	9.44	14.08	28.32	7.83

表 4 部分核电厂变压器零序电流互感器配置

Table 4 Some Nuclear Power Plant Transformer's Zero-sequence Current Transformer Configuration.

核电厂名称	接线方案	500 kV 引出线端 电流互感器	500 kV 中性点 侧电流互感器
Li	方案三	5P60, 30 VA, 2 000/1	5P60, 30 VA, 2 000/1
Ni	方案一	5P60, 30 VA, 4 000/1	5P60, 30 VA, 600/1
Ho	方案一	5P60, 30 VA, 2 000/1	5P60, 30 VA, 600/1
Ya	方案一	5P60, 30 VA, 2 000/1	5P60, 30 VA, 2 000/1
Ta	方案一	5P60, 30 VA, 2 500/1	5P60, 30 VA, 2 500/1
Lu	方案三	TPY, 15 Ω, 2 000/1	TPY, 15 Ω, 2 000/1

4 零序差动保护整定计算

零序差动保护的整定值计算首先进行必要的短路电流计算。系统在最大运行方式下, 计算三相短路和单相接地短路电流, 确定保护区外故障时穿越保护的最大不平衡电流; 系统在最小运行方式下, 计算单相接地短路电流, 验证保护所设定值的灵敏系数。

其次根据保护装置的保护原理及其运行时所需要设定的参数进行整定计算。保护装置的动作方程如与上述动作方程一至三相同或相近的, 可根据《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》(DL/T 684—2012)进行设定, 或者按保护装置的生产厂说明书进行整定; 与上述动作方程四相同的, 可按下述方法一进行整定计算, 与上述动作方程五相同的, 可按下述方法二进行整定计算。

4.1 整定计算方法一

1) 起始动作电流($I_{0.op.min}$)应大于变压器在额定负载正常运行时的不平衡电流:

$$I_{0.op.min} = K_{rel}(K_{er} + \Delta m) \frac{I_N}{n_a} \quad (37)$$

式中: I_N 为变压器接地绕组的额定电流; n_a 为变压器接地绕组引出线端电流互感器的变比; K_{rel} 为可靠系数, 通常取 1.3 ~ 1.5; K_{er} 为电流互感器的比误差, 取 0.01×2 ; Δm 为电流互感器的变比未完全匹配产生的误差, 取 0.05。

因此零序差动保护动作电流 ($I_{0.op.set}$) 可按下式整定:

$$I_{0.op.set} \geq I_{0.op.min} \quad (38)$$

2) 起始制动电流 ($I_{0.res.min}$) 宜按下式取值:

$$I_{0.res.min} = (0.8, \dots, 1.0) \frac{I_N}{n_a} \quad (39)$$

3) 比例制动系数 ($K_{0.sl}$), 即零序差动保护特性曲线的折线斜率, 最大的零序不平衡电流应大于零序差动保护区外短路故障时流过差动回路的最大不平衡电流:

$$I_{0.unb.max} = (K_{ap}K_{cc}K_{er} + \Delta m) \frac{I_{k.max}}{n_a} \quad (40)$$

式中: $I_{k.max}$ 为零序差动保护区外短路故障时穿越保护的最大故障电流周期分量初始值; K_{ap} 为非周期分量系数, 两侧同为 TP 级的取 1.0, 两侧同为 P 级的取 1.5 ~ 2.0; K_{cc} 为电流互感器的同型系数, 取 1.0。

对应区外短路故障时流经差动回路的最大不平衡电流的零序差动保护动作电流 ($I_{0.op.max}$):

$$I_{0.op.max} = K_{rel}I_{0.unb.max} \quad (41)$$

当区外短路故障时的最大制动电流 ($I_{0.res.max}$):

$$I_{0.res.max} = \frac{I_{0.k.max}}{n_a} \quad (42)$$

式中: $I_{0.k.max}$ 为零序差动保护区外接地短路故障时穿越保护的最大接地故障电流周期分量初始值;

那么零序差动保护动作特性曲线的折线斜率按下式计算:

$$K_{0.sl} = \frac{I_{0.op.max} - I_{0.op.min}}{I_{0.res.max} - I_{0.res.min}} \quad (43)$$

4) 灵敏系数 ($K_{0.sen}$) 校验, 在系统最小运行方式下, 按零序差动保护区内发生金属性接地短路时最小短路电流进行校验。

$$I_{0.op} = I_{0.op.set} + \left(\frac{I_{0.k.min}}{n_a} - I_{0.res.min} \right) K_{0.sl} \quad (44)$$

$$K_{0.sen} = \frac{I_{0.k.min}}{n_a I_{0.op}} \quad (45)$$

灵敏系数要求不小于 1.2^[2]。

式中: $I_{0.k.min}$ 为零序差动保护区内发生金属性接地短路时最小短路电流周期分量初始值; $I_{0.op}$ 的意义: 在零序差动保护特性曲线中, $I_{0.k.min}$ 所对应的动作电流。

4.2 整定计算方法二

1) 零序差动保护动作电流 ($I_{0.op.set}$) 的整定同整定计算方法一, 通常可设为 0.1 ~ 0.2 倍变压器接地绕组的额定电流, 即以变压器接地绕组的额定电流为基准值, 其标么值为 0.1 ~ 0.2。

2) 比例制动系数 ($K_{0.sl}$) 确定。

首先确定零序保护的最大动作电流 ($I_{0.op.max}$)。

$$I_{0.op.max} = K_{rel}(K_{ap}K_{cc}K_{er} + \Delta m) \frac{I_{0.N.max}}{n_a} \quad (46)$$

式中: $I_{0.N.max}$ 意义为, 在系统在最大运行方式下, 本厂一台机组, 500 kV 母线单相接地故障时, 变压器中性点汲出的零序电流周期分量初始值。

其次确定保护区外发生单相接地故障时的最大制动电流 ($I_{0.res.max}$)。

$$I_{0.res.max} = K_{0.res.ins} \frac{|I_A| + |I_B| + |I_C| + |I_{0.N.max}|}{n_a} \quad (47)$$

式中: $|I_A|$ 、 $|I_B|$ 、 $|I_C|$ 为接地绕组引出线端三相电流。在工程计算中可以忽略电流互感器饱和时的传变相移, 因此上式可简化为如下:

$$I_{0.res.max} = 2K_{0.res.ins} \frac{|I_{0.N.max}|}{n_a} \quad (48)$$

最后根据保护装置的动作原理, 其比例制动特性曲线是经过原点的折线, 因此折线的斜率, 即比例制动系数 ($K_{0.sl}$) 可按下式确定:

$$K_{0.sl} = \frac{I_{0.op.max}}{I_{0.res.max}} \quad (49)$$

根据多个项目的工程计算表明, 这种原理的保护特性曲线的折线斜率在数值上一般为零序差动保护动作电流标么值的三分之一。对于这种保护装置的制动特性, 折线斜率设为零也是可以的。

3) 灵敏系数 ($K_{0.sen}$) 校验。在系统最小运行方式下, 零序差动保护区内发生金属性接地短路时, 变压器中性点汲出的零序电流就是此时保护的動作电流:

$$I_{0.op} = \frac{I_{0.N.min}}{n_a} \quad (50)$$

式中: $I_{0.N.min}$ 为变压器中性点汲出的零序电流周期

分量初始值。

此时呈制动特性的电流为 $I_{0.res}$ 可按下式计算:

$$I_{0.res} = \frac{|I_{0.N.\Sigma}|}{n_a} \quad (51)$$

$$I_{0.N.\Sigma} = |I_{0.sys.min}| + |I_{0.N.min}| \quad (52)$$

式中: $I_{0.N.\Sigma}$ 为故障点总的零序电流周期分量初始值; $I_{0.sys.min}$ 为 500 kV 系统馈入故障点的零序电流周期分量初始值。灵敏系数如下式计算:

$$K_{0.sen} = \frac{I_{0.op}}{I_{0.res}K_{0.sl}} \quad (53)$$

灵敏系数要求不小于 $1.2^{[2]}$ 。

4.3 工程应用

根据不同接线方案,不同装置的保护原理,按照上述整定计算方法,可计算出 500 kV 变压器零序差动保护的运行定值。近几年投入运行和在建的核电厂 500 kV 变压器零序差动保护的配置情况,如下表 5 所示。

表 5 部分核电厂 500 kV 变压器零序差动保护

Table 5 Some Nuclear Power Plant Transformer's Zero-sequence Current Differential Protection

序号	核电厂名称	接线方案	保护装置	定值		灵敏系数
				启动值	斜率	
1	Li	方案三	T60	0.1	0.27	2.9
2	Ni	方案一	7UT635	0.18	0.06	5.6
3	Ho	方案一	7UT683	0.1	0.03	20.6
4	Ya	方案一	7UT683	0.1	0.03	25.3
5	Ta	方案一	7UT633	0.1	0.03	21.5
6	Lu	方案三	T60	在建	在建	在建

注: Ni 电厂仅指 1 号机组。

由表 5 可知:保护两侧的电流互感器均为同型号,即同为 TPY 或 5P;序号 1 和 4~5 的两侧电流互感器变比相同,启动值可以整得比较小;序号 2 和 3 的两侧电流互感器变比不同,尤其是序号 2 的差异大,不得不抬高保护启动值。零序电流纵差保护反映单相接地和小匝间短路的灵敏度都能满足要求。上述的零序差动保护自从商业运行至今,无误动、无异常现象,对于区外故障时可靠不动。

5 结论

在有效接地系统,双绕组变压器零序差动保护的电流互感器安装位置应根据变压器的结构特点和零序差动保护原理进行合理布置,两侧电流互感器

应同型号、同变比,保护装置的运行参数应根据其保护原理进行整定,在确保可靠性和选择性的前提下,力求提高保护的灵敏性和速动性。

参考文献:

- [1] 王维俭. 变压器保护运行不良的反思 [J]. 电力自动化设备, 2001, 21(10): 1-3.
WANG Weijian. Consideration on the Improper Operation of Transformer Protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(10): 1-3.
- [2] DL/T 684—2012, 大型发电机变压器继电保护整定计算导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
DL/T 684—2012, Guide of Calculating Settings of Relay Protection for Large Generator and Transformer [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [3] GB/T 50958—2013, 核电厂常规岛设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
GB/T 50958—2013, Code for Design of Conventional Island for Nuclear Power Plant [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [4] 王维俭, 桂林, 王祥珩. 主设备保护若干问题的商榷 [J]. 电力系统自动化, 2001(12): 58-61.
WANG Weijian, GUI Lin, WANG Xiangheng. Discussion on Some Problems Existing in the Main Equipment Protection [J]. Automation of Electric System, 2001(12): 58-61.
- [5] 毛锦庆, 屠黎明, 邹卫华. 从加强主保护简化后备保护论变压器微机继电保护装置 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 1-6, 18.
MAO Jinqing, TU Limin, ZOU Weihua. Discussion on The Digital Transformer Protection from The Standpoint of Strengthening Main Protection and Simplifying Backup Protection [J]. Automation of Electric System, 2005, 29(18): 1-6, 18.
- [6] GB/T 14285—2006, 继电保护和安全自动装置技术规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
GB/T 14285—2006, Technical Code for Relaying Protection and Security Automatic Equipment [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [7] 王维俭, 桂林. 主设备保护技术发展的回顾与前瞻 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 5-7.
WANG Weijian, GUI Lin. Review and Prospect of Technology Development of Protection for Electric Main Equipment [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 5-7.
- [8] DL/T 866—2004, 电流互感器和电压互感器选择及计算导则 [S]. 北京: 中国电力出版社出版, 2004.
DL/T 866—2004, Guide for Selection and Calculation of Current Transformers and Voltage Transformers [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.