

变压器差动保护的 P 级电流互感器“同型”匹配方法

黄 婷¹, 郑 涛¹, 陆格野¹, 刘连光¹, 白加林², 高昌培²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;
2. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 为有效防止变压器区外故障时因各侧电流互感器饱和程度不一致引起的差动保护误动, 基于电路、磁路分析, 以变压器发生区外故障时各侧电流互感器同时进入饱和为原则, 提出变压器差动保护中各侧 P 级电流互感器的“同型”匹配方案。该“同型”匹配方案可消除由变压器各侧电流互感器饱和程度不一致引起的不平衡电流, 防止变压器发生区外故障时因电流互感器饱和引起的误动。利用所提方案得到了影响电流互感器“同型匹配”的因素。利用 PSCAD/EMTDC 进行了大量的仿真分析, 验证了所提“同型”匹配方案的有效性。基于研究结果给出了变压器差动保护用电流互感器的选型建议。

关键词: 电流互感器; 变压器; 差动保护; 电流互感器饱和; “同型”匹配; 不平衡电流

中图分类号: TM 77; TM 452

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.032

0 引言

差动保护作为电气设备的主保护而得到了广泛应用, 其动作性能受到差动回路不平衡电流的影响。对变压器差动保护而言, 因涉及不同电压等级下的 2 个甚至多个电流互感器 CT(Current Transformer), 其差动回路的不平衡电流取决于各侧电流互感器的相对误差而不是单个电流互感器的误差^[1]。同时, 单个电流互感器选型时的校验方法只能减轻电流互感器的饱和程度及延长入饱和时间, 不能保证在故障过程中不发生暂态饱和^[2-4]。因此, 即使单个电流互感器的误差满足继电保护要求, 若变压器各侧电流互感器特性不匹配, 发生区外故障时也可能出现变压器一侧电流互感器不饱和、另一侧电流互感器深度饱和的情形, 该情况下差动保护不平衡电流将急剧增大, 进而导致差动保护误动。文献[5]在分析变压器保护用电流互感器“同型”问题时指出电流互感器“同型”的含义是: 各电流互感器的安匝数、几何尺寸相同, 铁芯、二次绕组的材料完全一样, 但各自的变比可不同。若变压器两侧电流互感器配置“同型”, 将可保证变压器发生区外故障时两侧电流互感器的静态工作点相对一致, 入饱和时间相同, 进而极大地减小不平衡电流, 防止差动保护误动。因此, 电流互感器的“同型”问题是影响不平衡电流的重要因素之一, 且电流互感器的“同型”匹配应包括安匝数匹配、几何尺寸匹配、二次绕组材料匹配、二次负载匹配、变比匹配等多方面的匹配, 以达到变压器各侧电流互感器在暂态过程中同时进入饱和的目的。

目前, 对变压器差动保护中各侧电流互感器“同型”问题的研究尚缺乏详细的理论支撑及运行经验, 主要集中在电流互感器二次负载的匹配上。文献

[6]指出, 保护用电流互感器的绕组特性与二次回路配合不当会造成不平衡电流增大, 可能使差动保护误动, 建议对电流互感器的二次绕组伏安特性、二次回路负载进行检测; 文献[7-8]指出, 变压器差动保护中各侧电流互感器的二次负载匹配是减小不平衡电流的有效方法, 且各侧电流互感器的二次负载是否匹配, 不能以实测二次负载进行简单比较, 而应该按照同一输出功率下, 两侧电流互感器的二次饱和电动势与二次感应电动势之比相等的条件进行匹配。

上述研究结论均以理论分析为基础, 分析了电流互感器“同型”问题带来的影响及对应的解决措施, 但缺乏详细的对比论证, 且主要集中在电流互感器二次负载的匹配。本文基于电路、磁路分析, 得到了影响变压器差动保护用各侧电流互感器“同型”匹配的因素及评估方法, 并结合变压器差动保护误动案例进行了仿真验证, 仿真结果表明该“同型”匹配方案可明显减小发生变压器区外故障时因电流互感器饱和引起的差动不平衡电流, 并据此提出了切实可行的解决措施及选型建议, 有效避免了变压器一侧电流互感器不饱和、另一侧电流互感器严重饱和引起变压器发生区外故障时差动保护的误动。

1 电流互感器“同型”匹配原理

1.1 电流互感器的饱和特性及其对不平衡电流的影响

图 1 为电流互感器折算至其二次侧的等值电路。图中, N_1 为一次绕组匝数; N_2 为二次绕组匝数; i_p 为一次侧电流; i_p' 为折算到二次侧的一次电流; i_s 为电流互感器二次侧电流; i_μ 为电流互感器励磁电流; X_μ 为电流互感器励磁电抗; X_{CT} 为电流互感器二次绕组电抗; R_{CT} 为二次绕组电阻; $Z_{load} = R_b + jX_b$, 为电

流互感器负载; E_2 为折算至电流互感器二次侧的感应电动势; U_2 为电流互感器二次负载端电压。

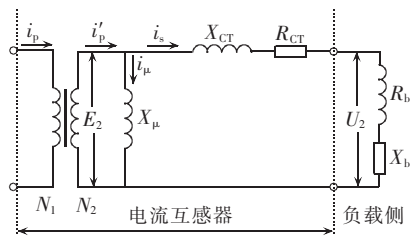


图 1 电流互感器折算至二次侧的等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of CT,obverted to secondary side

由图 1 可得:

$$i_s = i_p / n_{CT} - i_{\mu} \quad (1)$$

其中, $n_{CT} = N_2 / N_1$,为电流互感器变比。

电流互感器励磁电流 i_{μ} 的存在使 i_p' 、 i_s 数值不等,使电流互感器传变产生误差。

电流互感器正常运行时,电流互感器传变误差在变压器差动回路中引起的不平衡电流为^[9]:

$$I_{unb} = |I_{\mu 2} - I_{\mu 1}| \quad (2)$$

其中, $I_{\mu 1}$ 、 $I_{\mu 2}$ 分别为电流互感器 1、电流互感器 2 的励磁电流相量。

正常运行时,作用在电流互感器一次侧的电流是幅值较小的工频电流,铁芯磁密只运行在图 2 中靠近原点的小磁滞回环中,工作在低磁密下,其励磁阻抗很大,用于产生工作磁密的励磁电流非常小,即 $i_{\mu} \approx 0$,此时可认为电流互感器二次电流正比于一次电流^[10]。差动保护动作电流的整定已考虑了电流互感器可容许的最大稳态相对传变误差,对于误差系数为 10% 的电流互感器而言,最大稳态相对传变误差为 20%,因此,上述稳态传变误差不会造成差动保护误动。

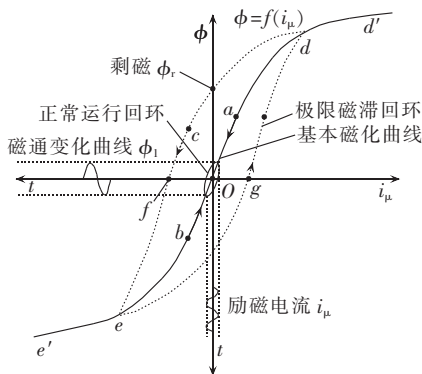


图 2 电流互感器铁芯的磁滞回线

Fig.2 Magnetic hysteresis loop of CT

而变压器发生区外故障时,故障电流不仅包含数值很大的稳态电流,还包含按指数形式衰减的非周期分量,该非周期分量将明显改变电流互感器铁芯的运行工况,铁芯磁通将随一次电流非周期分量的

时间积分作用而不断上升,直至达到饱和磁通,使电流互感器出现暂态饱和^[8,11]。达到暂态饱和后,电流互感器的励磁阻抗明显减小,用于产生工作磁密的励磁电流将明显增大,进而使电流互感器的暂态传变误差明显增大。

考虑变压器区外故障最严重的情况且忽略电流互感器的比差和角差,当两侧电流互感器均未出现饱和时,同一故障电流下完全由两侧电流互感器特性不同造成的暂态不平衡电流为^[12]:

$$i_{unb} = i_{\mu 1} - i_{\mu 2} = I_{12m} \left[\frac{T_p}{T_{s2} - T_p} e^{-\frac{t}{T_{s2}}} - \frac{T_p}{T_{s1} - T_p} e^{-\frac{t}{T_{s1}}} - \frac{T_p(T_{s1} - T_{s2})}{(T_p - T_{s1})(T_p - T_{s2})} e^{-\frac{t}{T_p}} \right] \quad (3)$$

其中, $i_{\mu 1}$ 、 $i_{\mu 2}$ 分别为变压器两侧电流互感器 1、电流互感器 2 的励磁电流; I_{12m} 为折算到电流互感器 1 二次侧的一次电流周期分量幅值; T_{s1} 、 T_{s2} 分别为变压器两侧电流互感器 1、电流互感器 2 的时间常数; T_p 为一次系统时间常数。

暂态过程中的励磁电流比稳态过程中的励磁电流大得多^[13],变压器各侧均配置 P 级电流互感器时,P 级电流互感器之间的时间常数相差较小,造成的不平衡电流不会导致具有比率制动特性的差动保护误动^[5]。

含非周期分量的暂态电流易使电流互感器饱和,若出现变压器一侧电流互感器严重饱和、另一侧电流互感器未饱和的情况,则暂态不平衡电流将显著增大,极易造成变压器差动保护误动^[14-17]。

1.2 电流互感器“同型”匹配原理

当电流互感器的误差满足继电保护要求时,必须对变压器两侧电流互感器进行特性匹配,使发生区外故障时在最大短路电流作用下的两侧电流互感器同时进入饱和,避免出现发生区外故障时变压器一侧电流互感器不饱和、另一侧电流互感器深度饱和的情况,这也是电流互感器“同型”匹配的目标。为简化计算,理论分析时做如下假设:

a. 电流互感器二次负载一般电阻占优,故设电流互感器二次负载为纯阻性;

b. 不计电流互感器铁损,即不考虑磁滞特性,并以常用的两折线式磁化特性代替磁滞回线。

变压器两侧电流互感器的两段式磁化特性曲线 $\psi - i$ 如图 3 所示。变压器正常运行时,高压侧电流互感器 1、低压侧电流互感器 2 的工作点分别为 C_1 、 C_2 ,电流互感器 1、2 的饱和点分别为 D_1 、 D_2 ,为避免出现变压器一侧电流互感器未饱和、另一侧电流互感器严重饱和的情况,必须保证在发生区外故障时,在最大短路电流作用下的两侧电流互感器同时进入饱和,即图 3 中两侧电流互感器的工作点连线的斜率必

侧的电流互感器二次额定电流),则动作方程为:

$$I_{op} = \begin{cases} 0.2I_e & I_{res} \leq I_e \\ 0.2I_e + 0.5(I_{res} - I_e) & I_{res} > I_e \end{cases} \quad (9)$$

其中, I_{op} 为动作电流; 差动电流 $I_d = |\sum I_i|$, 制动电流 $I_{res} = \sum |I_i|/2$, 本误动案例中, $i=1$ 和 $i=2$ 时, I_i 分别为变压器高压侧电流互感器 1 和变压器低压侧电流互感器 2 的二次侧电流。

图 5、图 6 给出了变压器两侧电流互感器的电流波形和差动电流波形(已折算为标么值,后同),图 7、图 8 分别为差动电流-制动电流的动作轨迹及保护动作情况。由图 5、图 6 可知,故障切除前,变压器两侧电流互感器出现不同程度的饱和,差动电流增大,最大差动电流的基波电流为 6.5428 p.u.,此时对应的制动电流为 9.4306 p.u.,进入比率制动特性的动作区,但由图 6、图 8 可知,此时差动电流的二次谐波比大于 20%,差动保护闭锁,未出现误动;断路器重合后,两侧电流互感器仍出现了不同程度的饱和,差动电流增大,最大基波电流为 5.1021 p.u.,对应的制动电流为 8.0743 p.u.,差动保护工作点进入动作区,但此时由于差动电流的二次谐波比小于 20%,所以差动保护开放,差动保护动作跳出口断路器,保护误动。

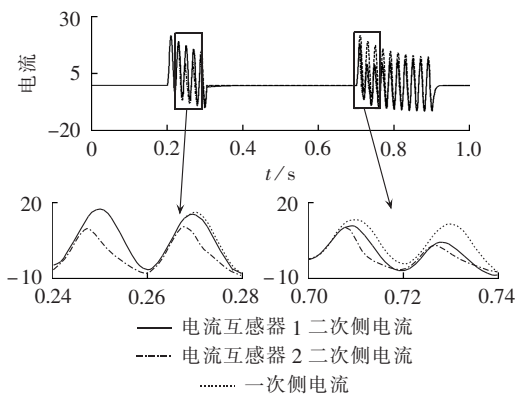


图 5 “同型匹配”前,发生区外故障时各侧电流互感器的二次电流波形

Fig.5 Secondary current waveforms of CTs at different sides during out-zone fault before type-matching

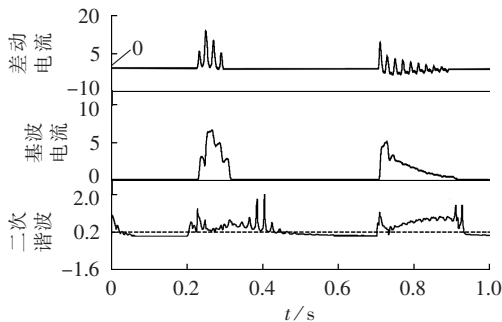


图 6 差动电流波形

Fig.6 Waveforms of differential current

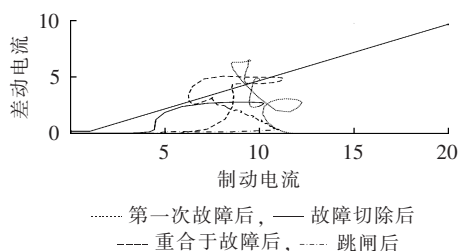


图 7 差动电流-制动电流动作轨迹

Fig.7 Operating track for differential current and restraint current

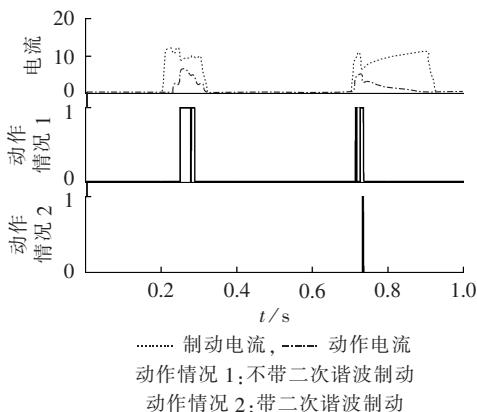


图 8 差动电流、制动电流及保护动作情况

Fig.8 Differential current, restraint current and protective actions

2.2 电流互感器匹配“同型”及仿真验证

为验证本文“同型”匹配方案的有效性,本节将对上述误动案例中的电流互感器特性进行“同型”匹配,分析不同调整方式如改变电流互感器二次负载、绕组匝数、横截面积等因素对应的匹配效果,并综合考虑一次系统时间常数、故障初相角、故障电流周期分量幅值等因素,对变压器各侧电流互感器在不同故障电流下的特性一致性进行了仿真分析。

上述误动案例中,变压器两侧电流互感器的实测励磁曲线及初始工作点位置如图 9 所示。对比图 3、图 9 可知,两侧电流互感器的初始工作点连线与各自的饱和点连线不平行。将表 1 中变压器两侧电流互感器的设计参数代入式(8),等式左边等于 0.4906,明显小于 1,因此,变压器两侧电流互感器的特性不匹配。以调整二次负载为例,当电流互感器 1 的二次负载调整为 5 Ω,其他参数不变时,由匹配等式(8)可得,电流互感器 2 匹配后的二次负载应变为 4.69 Ω,此时变压器两侧电流互感器的正常工作点位置如图 9 所示,由图 9 可见此时两电流互感器的初始工作点连线与各自的饱和点连线平行,工作点相对一致。图 10、图 11 为变压器两侧电流互感器通过调整二次负载实现“同型”匹配后的二次电流波形、差流波形及差动电流-制动电流的运行轨迹。

由图 10 可知,当调整二次负载实现“同型”匹配

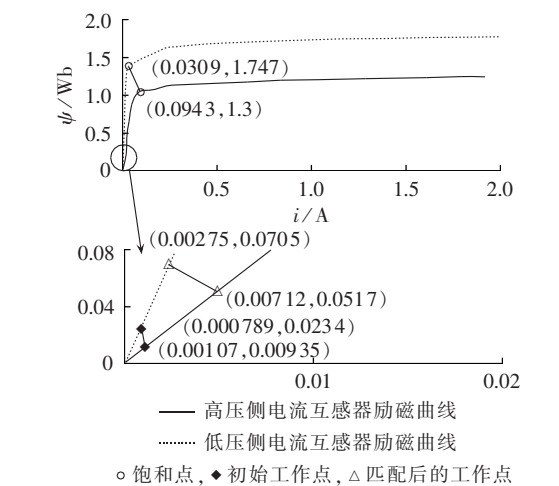


图 9 变压器两侧电流互感器的励磁曲线及工作点位置
Fig.9 Excitation characteristic curve and operating point for CTs at two sides of transformer

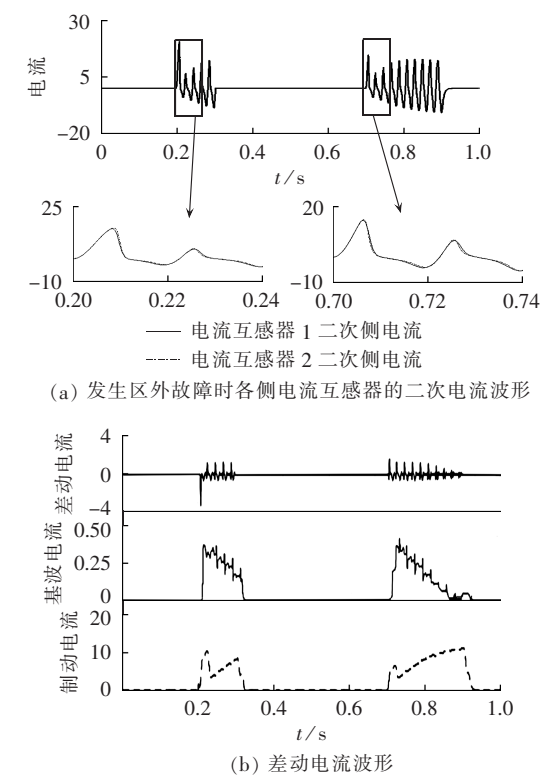


图 10 “同型”匹配后的电流波形
Fig.10 Currents waveforms after type-matching

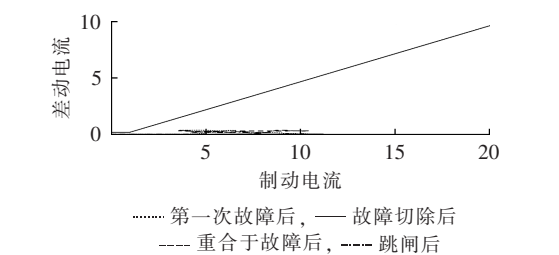


图 11 差动电流-制动电流动作轨迹
Fig.11 Operating track for differential current and restraint current

致,对应的差动电流也较小,差动电流最大基波电流仅为 0.4102 p.u.、0.4213 p.u.,相对误动案例中不匹配情况下的差动电流明显减小,对应的制动电流分别为 9.2163 p.u.、8.3830 p.u.,差动保护工作点严格处于制动区域,差动保护不误动,进而说明,本文“同型”匹配方案可明显改善变压器两侧电流互感器饱和程度完全不一致的情况,差动电流明显减小,差动保护不误动。

同理,分析了不同调整方式如改变电流互感器二次绕组匝数、横截面积、变比等单一因素或同时改变 2 个因素实现特性“同型”后对应的匹配效果,典型参数下的最大不平衡电流的基波电流 $I_{dl,m}$ 、对应的制动电流 I_{rs} 及动作情况见表 2,表中 $I_{dl,m}$ 和 I_{rs} 均为标么值。由表 2 可知,根据匹配公式实现电流互感器“同型”匹配后的差动电流,相对误动案例中的差动电流明显减小,差动保护工作点严格位于制动区域,未出现误动情况,说明本文“同型”匹配方案是有效的,且减小差动电流的效果明显,可作为变压器两侧电流互感器“同型”匹配的依据。

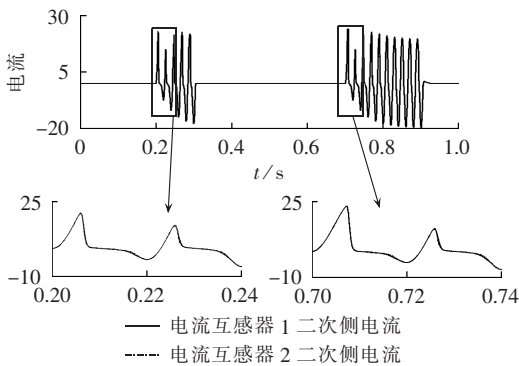
表 2 不同调整方式实现“同型”匹配后的差动电流
Table 2 Differential currents after type-matching by different regulation methods

调整因素		故障编号	$I_{dl,m}$	I_{rs}	是否动作
仅调整 1个因素	横截面积	1	0.5053	8.4145	否
		2	0.3418	4.4907	否
	二次绕组匝数	1	0.3215	5.8594	否
		2	0.3497	3.7776	否
	电 流 互 感 器 变 比	1	0.3256	5.2538	否
		2	0.3087	4.8734	否
	电 流 互 感 器 饱 和 磁 密	1	0.3598	4.2307	否
		2	0.4201	5.3629	否
同时 调整 2个因素	二次负载、 横截面积	1	0.2667	4.0658	否
		2	0.2818	3.3051	否
	横截面积、 二次绕组匝数	1	0.3312	3.8474	否
		2	0.3579	4.3467	否
	变比、二次 绕组匝数	1	0.2976	4.8891	否
		2	0.3037	4.4369	否

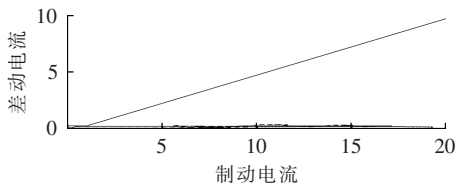
注:故障编号 1、2 分别表示故障切除前、重合于故障后的过程。

此外,本文综合考虑故障电流周期分量、一次系统时间常数、故障初相角等因素,研究了不同故障电流下所提“同型”匹配方案对减小不平衡电流的效果。以增大故障电流周期分量幅值为例,匹配前最大差动电流分别为 14.7221 p.u.、7.5634 p.u.,对应的制动电流分别为 13.9048 p.u.、12.8813 p.u.,故障切除前、重合闸后均出现误动,匹配后两侧电流互感器的电流波形、对应的差动电流波形、差动电流-制动电流运动轨迹如图 12 所示。由图 12 可知,经“同型”匹配后的差动电流的基波电流分别在 0.26 s、0.76 s 达到最大,分别为 0.3268 p.u.、0.3342 p.u.,对应的制动电流分别为 10.25 p.u.、10.26 p.u.,差动保

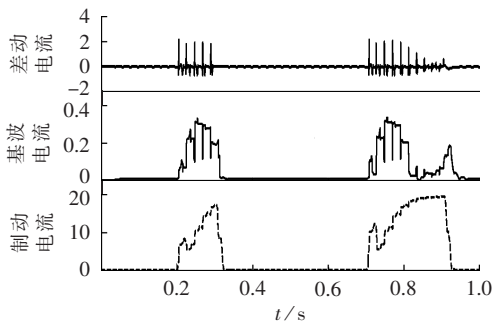
后,变压器两侧电流互感器的二次电流波形几乎一



(a) 发生区外故障时各侧电流互感器的二次电流波形



(b) 差动电流-制动电流动作轨迹



(c) 差动电流波形

图 12 “同型”匹配后,故障电流增大时的仿真波形

Fig.12 Simulative waveforms after type-matching for larger fault current

护运行点严格处于制动区域,保护不出现误动,说明本文的“同型”匹配方案能显著减小变压器发生区外故障时的不平衡电流。

同理,改变一次系统时间常数、故障初相角,利用表 3 所列参数进行仿真,可得 4 种故障电流作用下,“同型”匹配前后的 $I_{dl,m}$ 、 I_{rs} 及动作情况如表 4 所示。由表 4 可知,不同故障电流作用下,变压器两侧电流互感器经“同型”匹配后, $I_{dl,m}$ 明显减小,差动保护工作点严格位于制动区域,差动保护未出现误动作情况,说明本文的“同型”匹配方案是有效的,可作为变

表 3 仿真参数

Table 3 Parameters for simulation

仿真编号	一次系统 时间常数/ms	初相角/(°)	稳态周期 分量幅值
A	60	0	20
B	60	45	20
C	60	45	15
D	120	45	20

注:稳态周期分量幅值为标么值。

表 4 不同故障电流下“同型”匹配前后的电流

Table 4 Differential currents before and after type-matching for different fault currents

仿真 编号	故障 编号	匹配前情况			匹配后情况		
		$I_{dl,m}$	I_{rs}	是否动作	$I_{dl,m}$	I_{rs}	是否动作
A	1	20.49	21.32	是	0.46	11.09	否
	2	6.73	11.59	是	0.43	15.28	否
B	1	18.26	22.62	是	0.37	11.23	否
	2	6.88	12.90	是	0.38	15.30	否
C	1	13.98	15.28	是	0.45	9.95	否
	2	4.13	9.48	否	0.20	11.43	否
D	1	19.05	19.07	是	0.48	11.23	否
	2	5.32	8.99	是	0.24	13.70	否

注:故障编号 1、2 分别表示故障切除前、重合于故障后的过程。

压器两侧电流互感器“同型”匹配的依据。

综上所述,本文所提“同型”匹配方案是有效的,可明显改善变压器两侧电流互感器饱和程度明显不一致的情况,且减小不平衡电流的效果显著。

3 变压器差动保护用电流互感器的选型建议

对 P 类电磁型电流互感器而言,选型时是按稳态短路条件进行选择的,并为减轻可能发生的暂态饱和和影响留有适当裕度,要求准确限值系数满足:

$$K_{\text{alf}} \geq \frac{K_s K_{\text{pcf}} (R_{\text{CT}} + R_b)}{R_{\text{CT}} + R_{\text{bn}}} \quad (9)$$

其中, K_s 为给定暂态系数,依据应用情况和运行经验确定(如 220 kV 系统的给定暂态系数不宜低于 2); K_{pcf} 为保护校验系数; R_{bn} 和 R_b 分别为电流互感器二次额定负荷和实际负荷。

在应用时,主要校验稳态短路情况下的准确限值系数是否满足要求,一般按下列条件验算其性能和参数是否满足要求。

a. 一般验算:要求电流互感器的额定准确限值一次电流 I_{pal} 应大于保护校验故障电流 I_{pcf} ,必要时,还应考虑互感器暂态饱和的影响;

b. 按额定二次极限电动势验算:额定二次极限电动势大于保护动作性能要求的二次电动势;

c. 按实际准确限值系数曲线进行验算:根据实际的负载 R_b 查阅可知对应的 K'_{alf} 大于保护校验系数 $K_s K_{\text{pcf}}$ 。

上述常规 P 类电磁型电流互感器选型时的校验方法,虽减缓了电流互感器进入饱和的时间和减轻饱和程度,但不能保证在短路暂态过程中不进入饱和状态,仅利用当前广泛使用的比率制动特性仍无法避免变压器一侧电流互感器未饱和、另一侧电流互感器严重饱和时引起差动保护的误动,因此建议对变压器各侧电流互感器的“同型”匹配做进一步的特性一致性校验,使各侧电流互感器满足前文所述的匹配等式(8),若参数不满足匹配等式,则通过调

整实际电流互感器的可调参数使之成立,同时,在参数调整时,应尽量采取减轻饱和程度的措施,如减小两侧电流互感器的二次负载、增大铁芯截面积、增大二次绕组匝数等,应在保证电流互感器抗饱和能力的前提下实现“同型”,另一方面也可提高变压器两侧电流互感器的准确度。

4 结论

本文基于P级电流互感器的暂态特性进行了理论分析,得出变压器差动保护用各侧电流互感器应按式(8)进行“同型”匹配,且影响变压器差动保护用各侧电流互感器“同型”匹配的因素有铁芯的横截面积、二次绕组匝数、电流互感器变比、饱和磁密等。结合误动案例和仿真结果,验证了该“同型”匹配方案的有效性,依此提出了对变压器差动保护用电流互感器的选型建议,从而有效避免了因电流互感器饱和、特性明显不一致等原因引起的变压器区外故障差动保护出现误动。

参考文献:

- [1] 朱声石. 差动保护的暂态可靠性[J]. 继电器, 2002, 30(8): 1-6.
ZHU Shengshi. The transient reliability of differential protection [J]. Relay, 2002, 30(8): 1-6.
- [2] 余祥坤, 吕艳萍, 杨丽, 等. 与 ECT 混合用于差动保护的电磁型 CT 的校验方法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 275-280.
YU Xiangkun, LÜ Yanping, YANG Li, et al. A verification method for electromagnetic current transformers mixedly applied in differential protection with electronic current transformers [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 275-280.
- [3] 殷伯云, 罗志娟, 杨丽, 等. 主变差动保护采用不同原理 CT 的仿真研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 281-286.
YIN Boyun, LUO Zhijuan, YANG Li, et al. Simulation analysis of power transformer differential protection adopting current transformers based on different principles [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 281-286.
- [4] 李旭, 黄继东, 倪传坤, 等. 不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 141-145.
LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.
- [5] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996: 53-109.
- [6] 刘春艳, 周多思. 保护用电流互感器的特性检测及应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 94-98, 102.
LIU Chunyan, ZHOU Duosi. Characteristic test and application analysis of protection's CT [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 94-98, 102.
- [7] 朱声石. 差动保护采用 P 级电流互感器的问题[J]. 继电器, 2000, 28(7): 4-7.
ZHU Shengshi. Differential protection using class P current

transformer [J]. Relay, 2000, 28(7): 4-7.

- [8] 陶军, 白全新, 辛东昊, 等. 继电保护用 P 级电流互感器性能评估方法[J]. 内蒙古电力技术, 2010, 28(4): 17-20.
TAO Jun, BAI Quanxin, XIN Donghao, et al. Performance appraisal procedure of P class current transformer [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2010, 28(4): 17-20.
- [9] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [10] 李秉宇, 郝晓光. 保护用电流互感器励磁特性测试及误差校验 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 146-149.
LI Bingyu, HAO Xiaoguang. Excitation characteristics test and error checkout for protective CT [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 146-149.
- [11] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [12] 任先文, 徐宏雷, 孙楷淇, 等. 非周期分量对电流互感器饱和特性的影响的仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 6-9.
REN Xianwen, XU Honglei, SUN Kaiqi, et al. Simulation of influence of current transformer saturation characteristic by aperiodic current [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 6-9.
- [13] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1989: 174-191.
- [14] 张臻, 程铮, 王慎杰. CT 混搭时变压器涌流识别问题分析[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 92-96, 101.
ZHANG Zhen, CHENG Cheng, WANG Shenjie. Analysis on transformer inrush recognition problem in CT mashup [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 92-96, 101.
- [15] 毕大强, 冯存亮, 葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和和识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 184-190, 235.
BI Daqiang, FENG Cunliang, GE Baoming. Research on identification of partial transient saturation in current transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 184-190, 235.
- [16] 李瑞生, 路光辉, 王强. 用于线路差动保护的电流互感器饱和判据[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 70-73.
LI Ruisheng, LU Guanghui, WANG Qiang. Transformer saturation criterion for line differential protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4): 70-73.
- [17] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于数学形态学的电流互感器饱和和识别判据[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 46-50.
LIN Xiangning, LIU Pei, GAO Yan. A novel method to identify the saturation of the current transformer using mathematical morphology [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 46-50.

作者简介:



黄婷

黄婷(1992—),女,江西宜春人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:hting27@foxmail.com);

郑涛(1975—),男,山东济南人,副教授,博士,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:zhengtao_sf@126.com);

陆格野(1993—),女,江苏扬中人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:327522647@qq.com)。

(下转第 223 页 continued on page 223)

作者简介:



沈全荣

沈全荣(1965—),男,江苏吴江人,研究员级高级工程师,硕士,从事电力主设备微机保护的研究、开发和管理工
作(E-mail:shenqr@nrec.com);

陈佳胜(1975—),男,湖北大冶人,高级工程师,硕士,从事电力主设备微机保护的研
究和开发工作(E-mail:chenjs@nrec.com);

陈俊(1978—),男,江苏姜堰人,高级

工程师,硕士,从事电力主设备微机保护的研究、开发和管理工
作(E-mail:chenj@nrec.com);

郭自刚(1979—),男,湖北随州人,高级工程师,硕士,从
事电力主设备微机保护方面的研究和开发工作(E-mail:
guozg@nrec.com);

王光(1980—),男,内蒙古达拉特旗人,高级工程师,硕
士,从事电力主设备微机保护的研究和开发工作(E-mail:
wangg@nrec.com)。

LOE protection criterion based on admittance characteristic for
hydraulic generator

SHEN Quanrong, CHEN Jiasheng, CHEN Jun, GUO Zhigang, WANG Guang
(Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Traditional LOE (Loss-Of-Excitation) protection for hydraulic generator commonly adopts the state stability limit criterion based on impedance principle or admittance principle. Though applied widely in practical engineering, there are still some problems. Without fitting, a teardrop-shaped admittance curve of LOE state stability limit is directly deduced based on the LOE process of salient-pole generator and a new LOE protection criterion based on admittance principle is proposed to reflect the actual state stability limit of hydraulic generator. Its setting is easy and its application effect is good.

Key words: excitation-loss; admittance criterion; salient-pole generator; static stability boundary; teardrop-shaped curve

(上接第 219 页 continued from page 219)

Type-matching of P-class CTs for differential protection of power transformer

HUANG Ting¹, ZHENG Tao¹, LU Gey¹, LIU Lianguang¹, BAI Jialin², GAO Changpei²

(1. State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Dispatching and Control Center of Guizhou Power Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: Aiming at the misoperation of power transformer differential protection due to the saturation difference among the CTs (Current Transformers) of different sides during out-zone faults, a type-matching scheme is proposed for the P-class CTs at different sides of power-transformer differential protection, which, based on the analysis of electric and magnetic circuits, considers that the CTs at different sides enter saturation simultaneously as a principle to eliminate the unbalanced current caused by the saturation difference among the CTs of different sides and thus avoid the misoperation of power transformer differential protection during out-zone faults. The influencing factors of CT type-matching are attained. Numerous PSCAD/EMTDC simulations are carried out to verify the effectiveness of the proposed scheme and suggestions about CT type selection for power transformer differential protection are given based on the research results.

Key words: current transformers; power transformers; differential protection; CT saturation; type-matching; unbalanced current