

牵引变压器差动保护 误动原因分析及解决方案

林国松, 李群湛

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 通过对一次牵引变压器的差动保护误动作情况进行分析, 判断为保护装置内部电流互感器(TA)暂态饱和引起, 对该类型 TA 的测试也证实推断的正确。减少和避免 TA 饱和对保护影响的方法有多种。外部故障时, 对各分相采用差流变化量与制动电流变化量的异步出现特性可识别 TA 暂态饱和。基于该次牵引变压器差动保护外部 TA 接线的情况, 异步法在该次故障识别中失效; 采用三相制动电流变化量之和与差动电流变化量之和进行判别, 可以判断外部故障的 TA 饱和, 从而暂时闭锁保护, 并通过仿真验证了该判据的合理性。

关键词: 差动保护; TA 暂态饱和; 异步法

中图分类号: TM 922.73; TM 772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)05-0122-04

0 引言

电流纵联差动保护原理简单可靠, 由于其良好的选择性, 广泛应用于线路、变压器等元件的主保护。但是, 由于差动保护采用的电流互感器(TA)在保护区内外会出现饱和现象, 容易引起误动或拒动^[1-2]。TA 饱和可分为 2 类: 一类是大容量短路稳态对称电流引起的饱和, 另一类是短路电流中含有非周期分量和铁芯存在剩磁而引起的暂态饱和^[3-4]。这 2 类 TA 饱和的特性有很大不同, 引起的误差差别也很大。一般采用的方法有异步识别法^[5]、小波识别法^[6]、电流比相法^[7]等, 但在众多文献中, 鲜有关于装置内部 TA 暂态饱和判别的分析。在此通过对一次牵引变压器外部牵引网异相短路导致的误动作情况进行分析, 判断为装置 TA 暂态饱和引起, 并根据实际情况改进了异步法识别外部故障时 TA 饱和判据。

1 变压器差动保护误动作

在我国电气化铁路中, 直接供电线路常常采用 Y/Δ-11 接线三相变压器, 在变压器次边 c 相接地, a、b 相给 2 个供电臂(铁路牵引供电系统中常称 α 相、β 相)供电, 其中 α、β 相间采用分相绝缘器隔离。当机车经过分相绝缘器时, 必须降弓通过, 如果由于各种原因, 不能及时降弓, 可能导致 α、β 相近区短路, 成为异相短路, 如图 1 所示。异相短路发生时, 应由对应的 2 个馈线断路器(QF₃、QF₄)跳闸隔离故障。

变压器采用电流纵差保护作为主保护, 采用高压侧电流二次谐波闭锁, 其中, 原边 TA 接线采用三相“Δ”接, 次边采用两相“Y”接, 如图 2(a)所示, 保护

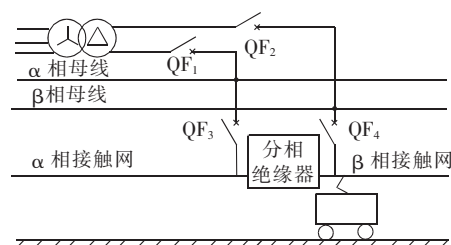
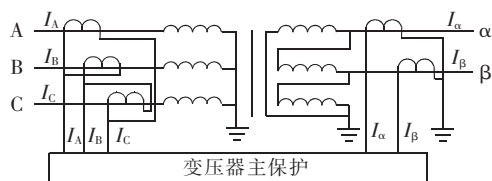
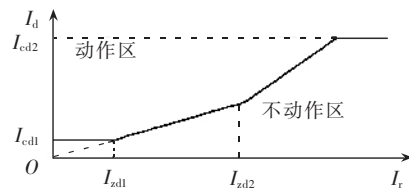


图 1 供电牵引网异相短路示意图

Fig.1 The short circuit between two phases of traction power network



(a) 差动保护回路接线图



(b) 比率制动曲线

图 2 牵引变压器差动保护接线及比率制动曲线

Fig.2 The connection and ratio restraint curve of differential protection for traction transformer

采用双折线原理, 如图 2(b)所示, 差动保护的三相制动力和三相差动量分别为

$$\begin{aligned} I_{da} &= |I_A - I_a|, & I_{ra} &= |I_A + I_a| / 2 \\ I_{db} &= |I_B - I_b|, & I_{rb} &= |I_B + I_b| / 2 \\ I_{dc} &= |I_C - I_c|, & I_{rc} &= |I_C + I_c| / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{k_{ph}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}$$

最近,在某电气化铁路上发生异相短路,无时限的变压器差动保护在馈线断路器动作前出口导致越级跳闸。其中,差动保护的启动电流为 $I_{dz}=2.28\text{ A}$,二次谐波闭锁定值为 20% ,双折线比率制动 I 段、II 段斜率分别为 $k_1=0.4$ 、 $k_2=0.6$,比率 I 段、II 段制动电流分别为 $I_{r1}=4.55\text{ A}$ 、 $I_{r2}=10.2\text{ A}$ 。装置接收到的 5 路保护电流故障前后各两周期波形如图 3 所示(n 为采样点)。

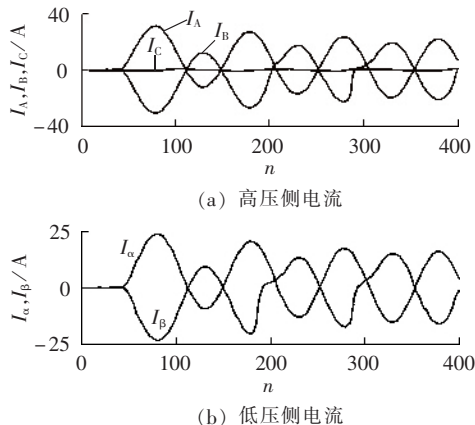


图3 牵引变压器差动保护故障录波图

Fig.3 Recorded fault waveforms of differential protection for traction transformer

由图3可以看出 I_A 、 I_B 和 I_α 、 I_β 的波形含有丰富的非周期分量且发生畸变,并随着非周期分量的减小,波形畸变也变小,这是由 TA 的特性决定的。

2 差动保护误动作分析

牵引网 α 、 β 相异相短路为牵引变压器近端 a、b 两相短路,变压器低压侧承受短路电流最大的是变压器 b 相,b 相波形最有可能发生畸变。因此,反映变压器 b 相电流 $I_\alpha=(I_a-I_b)/n_L$ 、 $I_\beta=(I_b-I_c)/n_L$ (I_a 、 I_b 、 I_c 为变压器低压侧线圈电流),均应发生畸变。故不是变压器低压侧线圈发生畸变,只可能是直接反映 I_β 的现场一次 TA(以下称一次 TA)或装置 TA(以下称二次 TA)饱和。

进入装置的 $I_A=(I_{AH}-I_{BH})/n_H$ 、 $I_B=(I_{BH}-I_{CH})/n_H$ 、 $I_C=(I_{CH}-I_{AH})/n_H$ (其中,电流带 H 下标表示变压器高压侧线圈电流),如果高压侧 B 相电流 (I_{BH}) 波形畸变情况,反映变压器高压侧 B 相线圈电流的 I_A 、 I_B 均应发生畸变。高压侧一次 TA 采用“ Δ ”连接形式,但一次 TA 直接反映线圈电流,也不会发生畸变(否则进入装置的两相都应该饱和),输入装置的只有 B 相电流发生畸变,据此推断是保护装置内部反映电流 I_B 的二次 TA 饱和和导致 I_B 发生畸变。

为了辨别装置 TA 是否容易发生暂态饱和,输入含直流分量的交流电流,采集到的故障波形在不同的直流分量和交流分量下会发生明显畸变,并且波形和本次要分析的故障波形非常相似,6 A 直流和 20 A 交流的波形如图 4 所示。

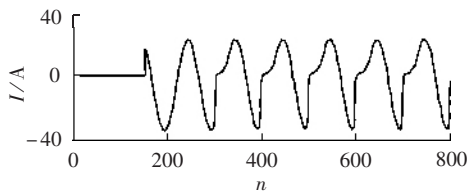


图4 保护装置电流互感器暂态饱和测试波形

Fig.4 Waveform of protection CT transient saturation test

鉴于前面推断出高压侧二次 TA 饱和,低压侧电流畸变极有可能是二次 TA 饱和引起。需要补充的是,低压侧 β 相电流畸变是一次还是二次 TA 饱和引起,不影响以后的分析。二次 TA 暂态饱和主要受非周期分量和短路电流大小影响,试验也证实如此。

TA 饱和的原因有 2 种,由图 2 所示波形图可以看出,故障电流比较小,根本没有达到 TA 标称的 20 倍饱和的标准,而波形包含衰减直流分量,初始直流量都在 10 A 上下,可以判断不是故障稳态电流引起的 TA 饱和,而是非周期分量引起的 TA 暂态饱和。在装置采集到的高压侧电流中,大小基本相同的 A、B 相电流只有 B 相有畸变,是装置内部二次 TA 个体差异和当时 TA 的剩磁状况等因素形成;可以同样认为低压侧 β 相电流畸变也是同样原因引起。

图 5 所示为三相差动、制动电流经过每周 20 点递推傅氏变换的模值,可以看出 A、B 相差动不会动作。在采样点 40 前后,C 相差动电流大于制动

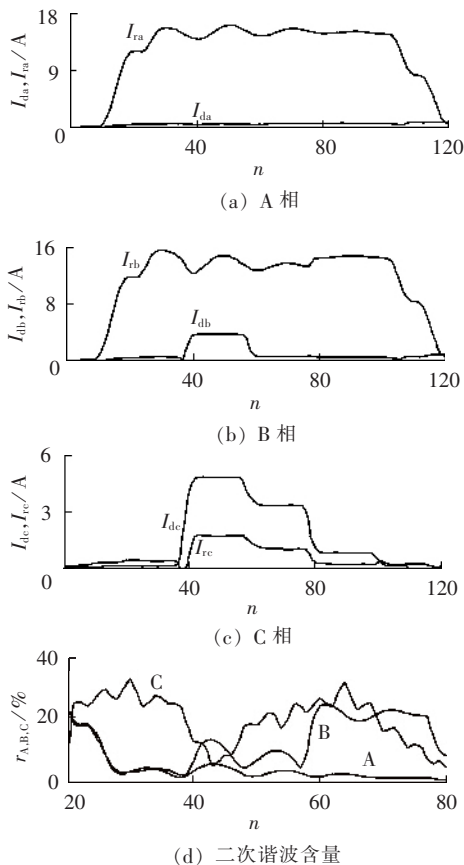


图5 A、B、C 相差动电流、制动电流和二次谐波

Fig.5 Differential current, restraint current and the secondary harmonic of phase A, B and C

电流,三次的 2 次谐波均不能起到闭锁作用,所以 C 相发生误动作,并且是由启动边界进入动作区。

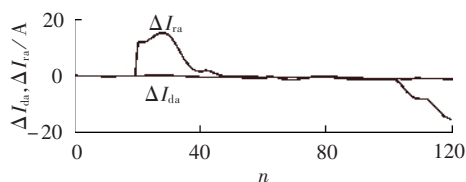
综上所述,本次变压器差动误动作因装置内部二次 TA 因非周期分量过大导致发生暂态饱和引起差流增大引起。

3 解决方案

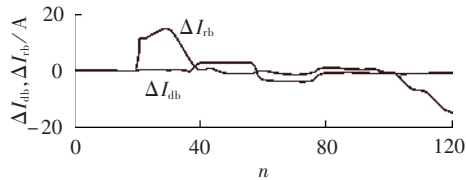
如何避免或减少 TA 饱和引起的问题,很多文献有论及^[4-11],但是鲜见有关于保护装置内部 TA 饱和的分析,笔者认为两者饱和情况应基本类似。TA 在电流换向后的一段时间内不饱和,在短路开始的 1/4 周期内也不饱和,当发生外部故障时,差动电流和制动电流的不同步出现特性,制动电流较差动电流至少早 1/4 周期(即 5ms)。对于一次 TA 暂态饱和,异步法 TA 暂态饱和判别区内故障或区外故障是比较简单并易实现的一种方法^[5]。判据为

$$t \geq 5\text{ms}, \text{ 当 } \begin{cases} |\Delta I_r| > I_{th1} \\ |\Delta I_d| < I_{th2} \end{cases} \quad (2)$$

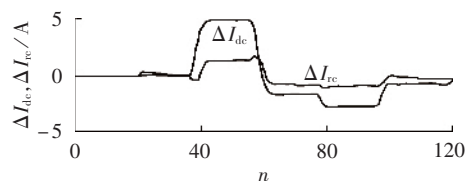
其中, $|\Delta I_d|$ 、 $|\Delta I_r|$ 分别为各项相差动电流变化量和制动电流变化量, I_{th1} 、 I_{th2} 为门槛值,门槛值根据经验数据决定,主要考虑变压器外部故障时的不平衡电流和制动电流。装置内部二次 TA 饱和判别区内外故障也可以采用类似一次 TA 饱和判别方法。对于本次故障,采用异步法得到的 A、B、C 相的 $|\Delta I_d|$ 、 $|\Delta I_r|$ 如图 6 所示。由图可以看到 C 相的制动变化量超前差动变化量只有约 2ms,不能满足判据要求。采用分相判别出现了问题,这是由差动保护的平衡方程引起,分析如下:异相短路有 $I_\alpha + I_\beta = 0$,则 C 相差动电流为



(a) A 相



(b) B 相



(c) C 相

图 6 C 相差动电流变化量和制动电流变化量

Fig.6 Differential current variation and restraint current variation of phase C

$$I_{dc} = |I_C - I_c| = |I_{CH} - I_{AH} + (I_\alpha + I_\beta)/k_{ph}| = |I_{CH} - I_{AH}| \quad (3)$$

同理可得,制动电流为

$$I_{rc} = |I_C + I_c| = |I_{CH} - I_{AH} - (I_\alpha + I_\beta)/k_{ph}| = |I_{CH} - I_{AH}| \quad (4)$$

变压器外部故障差动电流很小,在 TA 均不饱和的情况下,差动电流将等于制动电流并且基本上接近于零,C 相差动、制动电流波形如图 7 所示。TA 饱和时,除了 TA 饱和引起的电流,差动电流和制动电流都将很小,不能体现出 $|\Delta I_r|$ 引前 $|\Delta I_d|$ 出现的情形,式(2)判据也就不能识别出来。

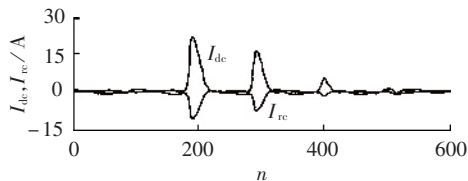


图 7 C 相差动电流和制动电流波形

Fig.7 Differential current and restraint current waveforms of phase C

由图 6(a)(b)可以看到,A、B 相受 TA 饱和影响不大,其制动电流超前差动电流,因此考虑采用三倍的 $|\Delta I_d|$ 、 $|\Delta I_r|$ 之和判断。新判据为

$$t \geq 5\text{ms}, \text{ 当 } \begin{cases} \sum |\Delta I_r| > I_{th1} \\ \sum |\Delta I_d| < I_{th2} \end{cases} \quad (5)$$

此时的 I_{th1} 考虑机车最大电流变化量引起的三相穿越最大制动电流, I_{th2} 要考虑发生穿越故障差动不平衡电流。当式(5)满足时,在差动电流和达到 I_{th2} 时闭锁差动保护,闭锁时间要考虑非周期分量的可能持续时间,同时要考虑避开馈线断路器电流速断、阻抗 I 段保护时限和馈线断路器动作时间和,一般取 60 ms。这里整定 $I_{th1} = 9.1\text{ A}$, $I_{th2} = 4.5\text{ A}$ 。根据这次故障按新判据得到如图 8 所示电流变化量之和,可以看出,即使 C 相差动电流超过了启动整定值 I_{th2} ,也因为差动变化量仍较制动变化量晚出现 20 多毫秒,从而满足式(3)(4)判据。新判据避免了由于外部 TA 接线引起的分相异步法失效问题,识别是外部故障后,再判别谐波含量大小,以确定是 TA 暂态饱和或稳态饱和,从而闭锁差动保护。

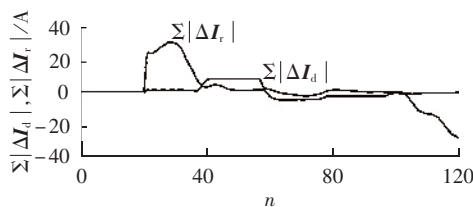


图 8 三相差动电流变化量之和及制动电流变化量之和

Fig.8 Sums of three phase differential current variations and restraint current variations

4 结论

通过对一次牵引变压器差动保护误动的分析,

可以得到3点结论。

a. 异相短路可能会因为TA暂态饱和引起牵引变压器差动误动作。

b. 非直流分量不仅会引起一次TA暂态饱和,也会引起装置TA暂态饱和,二次TA暂态饱和也应该值得研究。选择装置内部二次TA时,要考虑其暂态饱和性能。

c. 分相异步法可以判断区内外TA饱和问题,但是对于某些变压器、二次接线情况,判据可能会失效;综合考虑各相差动电流变化量之和及制动电流变化量之和的异步法能有效地解决分相异步法的失效问题。

参考文献:

- [1] 熊列彬,陈小川,陈德明,等. 秦沈线变压器差动保护误动作原因分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(8):104-107.
XIONG Lie-bin, CHEN Xiao-chuan, CHEN De-ming, et al. The analysis of mal-operation reason of transformer differential protection on Qin-Shen railway[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 104-107.
- [2] 陈三运. 一起CT饱和引起的继电保护拒动分析[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 85-87.
CHEN San-yun. Analysis of a miss operation of protection device caused by saturation of current transformer[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 85-87.
- [3] 袁季修,盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器, 2002, 30(2): 1-5.
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le. The transient saturation of current transformer and its application calculation[J]. Relay, 2002, 30(2): 1-5.
- [4] 胡晓光,于文斌. 电流互感器的暂态仿真及其铁芯饱和的小波分析[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 58-61.
HU Xiao-guang, YU Wen-bin. Transient simulation of current transformer and wavelet analysis of its core saturation[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 58-61.
- [5] 沈全荣,严伟,梁乾兵,等. 异步法电流互感器饱和判别新原理及其应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 84-86.
SHEN Quan-rong, YAN Wei, LIANG Qian-bing, et al. Asynchronous method for the recognition of current transformer saturation and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 84-86.
- [6] 李贵存,刘万顺,李鹏,等. 一种利用小波原理防止差动保护误动的新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 45-48.
LI Gui-cun, LIU Wan-shun, LI Peng, et al. New method for avoiding differential protection to mal-operate based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 45-48.
- [7] 程利军,龙翔,杨奇逊. 基于采样值的CT饱和和检测方案的研究[J]. 继电器, 2000, 28(8): 19-21.
CHENG Li-jun, LONG Xiang, YANG Qi-xun. The research of the sampling method for CT saturation in numeric busbar protection[J]. Relay, 2000, 28(8): 19-21.
- [8] 浦南桢,翟学锋,袁宁波. P级TA饱和对数字比率制动特性差动保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(4): 76-80.
PU Nan-zhen, ZHAI Xue-feng, YUAN Yu-bo. Impaction of P-type CT saturation on digital ratio-restricted differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4): 76-80.
- [9] 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 Rui-sheng, LU Guang-hui, WANG Qiang. Transformer saturation criterion for line differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4): 70-73.
- [10] 李丽,都洪基,刘林兴. 计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(7): 69-72.
LI Li, DU Hong-ji, LIU Lin-xing. Research on confirming CT's saturation in busbar protection by calculating harmonic ratio[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 69-72.
- [11] 张晓宇,毕大强,苏鹏声. 变压器外部故障切除后差动保护原因的分析[J]. 继电器, 2006, 34(1): 5-9.
ZHANG Xiao-yu, BI Da-qiang, SU Peng-sheng. Analysis of maloperation of transformer differential protection after external fault removed[J]. Relay, 2006, 34(1): 5-9.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

林国松(1974-),男,广西荔浦人,讲师,博士研究生,研究方向为变电站综合自动化系统和故障测距(E-mail:linguotong@tom.com);

李群湛(1957-),男,河北石家庄人,教授,博士,博士生导师,研究方向为电力系统分析、牵引供电理论、电能质量与控制。

Analysis of traction transformer differential protection misoperation and its solution

LIN Guo-song, LI Qun-zhan

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The analysis shows that the transient saturation of CT(Current Transformer) causes the misoperation of a traction transformer differential protection, which is verified by the CT test. There are different methods to reduce and avoid the influence of CT transient saturation. For external fault, asynchronism method can recognize CT transient saturation according to the different occurrence times of differential current variation and restraint current variation. But it is failed in this case because of the external connection conditions of CT. It is proposed to use the sums of 3-phase differential current variations and restraint current variations to recognize CT transient saturation and then block the differential protection. This criterion is validated by simulation.

Key words: differential protection; CT transient saturation; asynchronous method