

基于瞬时电流特征的电流互感器饱和识别改进方法

游步新,卜京,殷明慧

(南京理工大学自动化学院,江苏南京 210094)

摘要:电力系统发生区外故障时电流互感器饱和可能引起差动保护误动,常用的解决方法选取的开放差动保护门槛值固定,未考虑差动电流畸变程度的影响,在饱和程度较轻时门槛值偏大,使得开放保护延时较大。针对这一问题,提出了一种基于瞬时电流特征的电流互感器饱和识别的方法。该方法在虚拟制动电流识别电流互感器饱和的基础上,通过分析电流互感器的传变特性得到电流互感器饱和程度与一次电流及其导数的关系,利用BP神经网络拟合算法建立一次电流特征与最优门槛值之间的映射关系,从而可以自适应选取开放差动保护门槛值,以减少差动保护闭锁时间。仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:电流互感器;饱和;虚拟制动电流;神经网络;差动保护;继电保护

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.005

0 引言

由于电流差动保护原理简单,具有很高的灵敏度及速动性,已被广泛应用于线路及电气设备的主保护,其能否可靠识别区内故障,主要取决于对应的电流互感器能否正确地传变故障和非故障电流。当电流互感器发生铁芯饱和时就会使二次电流发生畸变从而影响差动保护的正确动作^[1-3]。

目前电流互感器饱和识别方法主要有差分法、时差法、小波变换法、谐波比法等^[4-8],其中同步识别法(即时差法)应用比较普遍。同步识别法根据区外故障引起电流互感器饱和时故障发生时刻与发生饱和时刻(即差动电流出现时刻)是否存在时间差识别区外故障,若识别为区外故障则闭锁差动保护一段时间,但如果在闭锁期间发生区外转区内故障时,该方法易产生延时动作。为此有学者根据差动电流自身的波形特征提出了一种基于虚拟制动电流采样点差动的电流互感器饱和识别方法^[9-10]。该方法能够可靠识别电流互感器退出饱和后即开放差动保护,在发生转换性故障时也能可靠开放差动保护动作,但是其开放保护门槛值选取固定,可能引起差动保护灵敏度降低、在发生转换性故障时反应不够迅速的问题。

针对上述问题,本文在虚拟制动电流法的基础上提出了一种根据故障时刻的瞬时电流特征来选取门槛值的方法,该方法利用神经网络重构故障电流特征与虚拟制动电流门槛值的映射关系,间接得到饱和程度对门槛值的影响。在发生转换性故障时,通过动态调整门槛值,使得电流互感器在饱和和不严重的情况下可以减少区外故障转区内故障时开放差

动保护所需要的时间,达到快速切除区内故障的目的。最后通过建模仿真,验证了本文所提方法的有效性。

1 虚拟制动电流采样点差动的电流互感器饱和识别方法

目前常见的防止电流互感器饱和和影响差动保护动作的辅助判据主要是:在系统发生故障时,先由时差法区分故障类型,当判断为区外故障时再利用前文提到的饱和识别方法来进行饱和判断,一旦发现电流互感器退出饱和即开放差动保护。本文主要利用基于虚拟制动电流采样点差动的方法来识别饱和情况。

1.1 基于差动电流特征的虚拟制动电流识别饱和方法

电流互感器饱和与未发生饱和时二次电流的情况如图1所示。由于铁芯磁通不能发生突变,在故障发生时刻电流互感器可以线性传变一次电流,其线性传变区的大小与电流互感器饱和程度有关。电流互感器饱和后随着一次电流反相,电流互感器开始逐渐退出饱和,在反相电流过零点附近会出现一段线性传变区,其线性传变区大小同样取决于电流互感器的饱和深度。

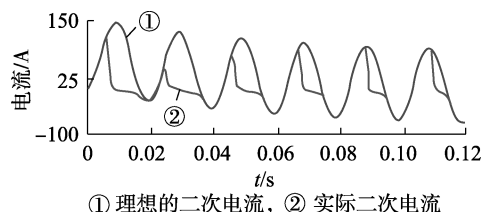


图1 电流互感器饱和后二次电流与理想二次电流波形

Fig.1 Waveforms of secondary current after CT saturation and ideal secondary current

发生区外故障时电流互感器饱和引起的差动电流在二次电流线性传变区为0,而发生区内故障时

收稿日期:2017-03-27;修回日期:2018-01-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61203129,61174038)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61203129,61174038)

的差动电流呈正弦波的形状,只有在二次电流过零点时刻才为 0,如图 2 所示。利用此特征,定义一个阈值作为虚拟制动电流,然后统计 1 个周期内电流大于该制动电流的点数 N ,如果 $N > 16$,则开放保护,否则闭锁保护^[11]。

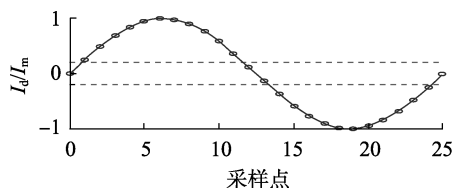


图 2 区内故障差动电流采样点情况

Fig.2 Differential-current sampling points of internal fault

文献[11-13]仿真表明该方法在发生区外故障且互感器饱和时能够可靠闭锁差动保护,在退出饱和时开放保护,同时在区外转区内故障时能够在 1 个周期内开放差动保护。但是在饱和程度较轻时,如果能自适应选择比较小的门槛值,则可以大幅减小区外转区内故障时开放保护的延时。以文献[4]中的算例为例,计算结果如图 3 所示。

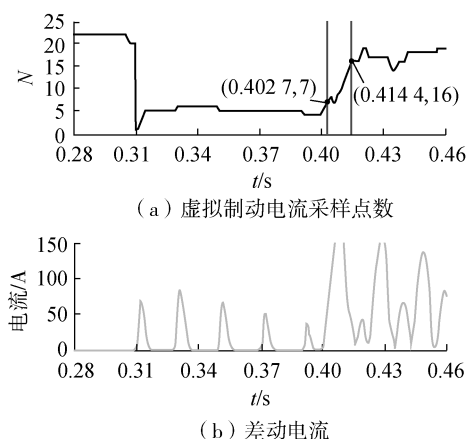


图 3 采用不同门槛值的保护开放情况

Fig.3 Conditions of unblocking differential protection with different thresholds

在 0.4 s 时刻发生区内短路故障,如果能将门槛值降到 7,则可以在 0.402 7 s 时刻开放保护,相比较以 16 为门槛值时 0.414 4 s 开放保护能够提前 11.7 ms,提高了速动性。

由上述仿真算例可知,如果可以根据最大的制动采样点设置门槛值就可以减少闭锁时间,提高差动保护的灵敏度。而虚拟制动电流采样点的多少与二次电流的畸变程度有直接联系,饱和程度决定了在饱和期间虚拟制动电流采样点数的最大门槛值。

1.2 影响电流互感器饱和程度的因素分析

为了分析影响电流互感器饱和程度的因素,首先需建立互感器的数学模型^[14],如图 4 所示(归算至一次侧)。归算后的一次电流为 i_1 ,励磁电流为 i_m ,二次电流为 i_2 ,二次感应电压为 e_2 ,将二次绕组的漏感、电阻与二次负载归并,得到二次侧等效电阻

和电感分别为 R_2 和 L_2 。

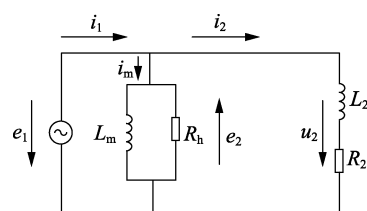


图 4 电流互感器的 T 型等效电路

Fig.4 T-type equivalent circuit of CT

由电流互感器一次侧和二次侧的电磁感应关系得:

$$e_2 = -e_1 = N_1 A dB/dt \quad (1)$$

其中, A 为矢量磁位; N_1 为线圈匝数; B 为磁感应强度。

二次侧电压方程:

$$e_2 = i_2 R_2 + L_2 di_2/dt \quad (2)$$

根据安培环路定理,可得一次电流、二次电流和励磁电流之间的关系为:

$$Hl = N_1 i_1 - N_2 i_2 = N_1 i_m \quad (3)$$

其中, H 为磁场强度; l 为闭合路径。

由式(1)~(3),可得一次电流、二次电流及微分磁导率之间的关系方程为:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{N_1^2 \frac{A}{l} \frac{dB}{dH} \frac{di_1}{dt} - R_2 i_2}{L_2 + N_1^2 \frac{A}{l} \frac{dB}{dH}} \quad (4)$$

考虑磁化曲线与磁通的关系:

$$\phi = BS \quad (5)$$

其中, $\phi = f(i_m)$ 为磁化曲线; S 为铁芯截面积。将 ϕ 代入式(4),若磁化曲线已知,则可通过数值积分的方法得到二次电流的大小。

进一步地,考虑磁滞对电流互感器传变的影响。根据非线性时域等效电路模型理论,只需将因饱和以及磁滞产生的电流相互叠加即可得到更精确的励磁电流。磁滞电流 i_h 为^[15]:

$$i_h = k_h V^{\beta-1} = k_h (d\phi/dt)^{\beta-1} \quad (6)$$

其中, β 为斯坦梅茨系数,由铁磁材料的性质决定; k_h 为常数。

由上述分析可知,电流互感器饱和的主要影响因素有以下 2 种:

a. 电流互感器自身参数,如二次回路阻抗、铁芯截面积、磁路长度、一二次匝数及比值等;

b. 一次电流波形,如一次电流的暂态分量和时间常数等,而影响一次电流大小的因素主要有故障点、故障类型、系统参数等。

一般情况下,电流互感器随着系统投运后,其型

号和参数即可确定,本文研究中假设电流互感器参数不变,对于电流互感器随环境因素的变化和老化影响导致的运行参数变化影响其饱和特性的问题,有待进一步研究。

因此,在电流互感器选定的情况下,磁化曲线即可确定,决定二次电流畸变程度,即电流互感器饱和程度的因素是一次电流的大小及故障时刻微分磁导率的大小。由于故障发生时刻能正确传递一次电流,由式(1)可得磁场强度的导数与一次电流的导数有关,根据式(1)、(2)可得磁通密度的导数与二次电流及其导数的大小有关,在饱和前可认为磁通密度的导数与一次电流及其导数的大小有关。

综上所述,电流互感器的饱和程度由一次电流及其导数决定。

2 虚拟制动电流采样点差动的电流互感器饱和识别改进方法

2.1 改进算法原理

根据第1节可知,电流互感器的饱和程度与一次电流大小情况有关,而最小门槛值与饱和程度有关,因此,合理地选择最小门槛值取决于一次电流波形特征。故障后的一次电流波形可分解为周期分量和衰减分量,不妨假设故障后一次电流为:

$$i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha) + C_0 e^{-t/T_p} \quad (7)$$

$$\frac{di_1(t)}{dt} = \omega I_m \cos(\omega t + \alpha) - \frac{C_0}{T_p} e^{-t/T_p} \quad (8)$$

其中, I_m 为一次电流的交流分量幅值; α 为一次电流的交流分量相角; C_0 为直流分量幅值; T_p 为时间常数。

由文献[4,6]可知,故障发生后到电流互感器发生饱和之间存在一定的线性传变区,根据线性传变区数据,可以近似拟合出一次电流波形。即对一次电流在任一故障时刻 t_x 处进行线性化处理,并整理得:

$$i_1(t) = A_1 + B_1 t + C_1 \cos \theta + D_1 \sin \theta \quad (9)$$

其中, $A_1 = C_0 \left(1 + \frac{t_x}{T_p} e^{-t_x/T_p} \right)$; $B_1 = -C_0 \frac{1}{T_p} e^{-t_x/T_p}$; $C_1 = I_m \sin \alpha$; $D_1 = I_m \cos \alpha$; $\theta = \omega t$ 。

通过线性区采样数据可以得到短路后一次电流的近似表达式,根据 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 4 个参数经过换算可以近似得到 I_m 、 α 、 C_0 、 T_p , 根据式(7)可以看出一次电流导数也与上述4个参数相关。

由第1节可知,电流互感器的饱和程度与一次电流有关,采样门槛值与一次电流存在对应关系,由于其内部机理映射关系复杂,可以使用回归分析或者神经网络算法^[15]等方法来拟合得到输入、输出之

间的对应关系。本文选用 BP 神经网络算法进行拟合,工作流程图如图5所示。图中, $I_{k-24,k}$ 为差动电流在1个周期内的采样值(1个周期采样25个点)。

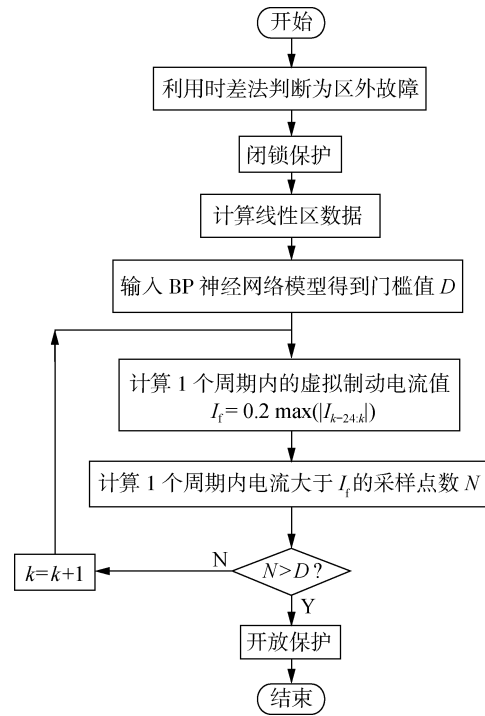


图5 改进后的判断流程图

Fig.5 Flowchart of improved judgement

具体步骤如下。

a. 检测线路出现故障,记录出现故障时刻 T_1 并进入下一步。

b. 判断是否出现差动电流,如果在发生故障 2 ms 内出现差动电流越限则发出跳闸指令,否则闭锁差动保护并进入下一步。

c. 提取 T_1 时刻到出现差动电流越限之间的二次电流采样数据,近似得到 I_m 、 α 、 C_0 、 T_p 。

d. 将得到的一次电流参数输入训练好的神经网络模型,得到该种工况下的门槛值 D 。神经网络模型的训练和参数优化方法见第2.2节。

e. 计算1个周期内大于虚拟制动电流的采样点数 N ,判断 N 是否大于门槛值 D 。如果 $N > D$,则开放保护,否则保持闭锁状态。

2.2 BP 神经网络优化模型的构建

本节利用 BP 神经网络构建一次电流波形特征与最优门槛值的映射关系,构建 BP 神经网络的具体步骤如下。

在多个故障场景下,提取故障时线性区电流波形数据,根据仿真或实测故障时的一次电流及门槛值 D 的数据,通过线性化近似和最小二乘拟合计算得到一次电流的波形特征参数 $x = (I_m, \alpha, C_0, T_p)$, 以此得到多组输入输出样本 (x, D) 。然后以此样本对 BP 神经网络进行训练,来构建一次电流波形特征与

最优阈值映射关系的神经网络重构模型。

训练过程中为提高 BP 神经网络的收敛性和精度,本文采用遗传算法(GA)得到的最优个体,然后分解为 BP 神经网络的连接权值和阈值,以此作为 BP 神经网络重构模型的初始参数^[16],工作流程如图 6 所示。

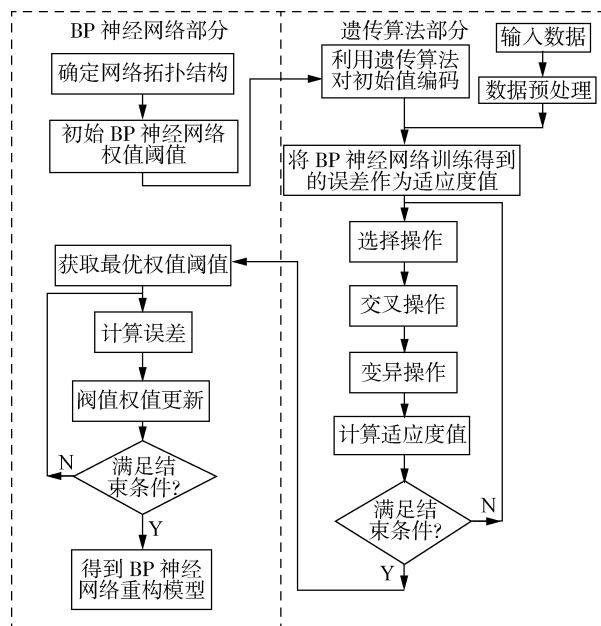


图 6 遗传算法-BP 神经网络算法流程

Fig.6 Flowchart of GA-BP neural network algorithm

3 仿真分析

3.1 仿真条件

利用 PSCAD 建立双端单回线供电系统,如图 7 所示。图中,系统电压等级为 500 kV,两侧电源相角差为 15° ,系统阻抗 $Z_R = Z_S = 1.0 + j23.18 \Omega$;线路选用 PSCAD 内的分布参数模型,导线为三相平行排列的频率模型;线路两端为电子式电流互感器(ETA)和电磁式电流互感器(TA)混用,电流互感器采用改进 J-A 互感器模型^[11]; K_1 为区内故障发生位置; K_2 为区外故障发生位置。

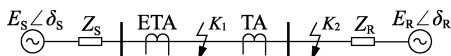


图 7 仿真系统结构图

Fig.7 Structure of simulation system

在线路各种短路故障中,单相接地和三相短路故障对电网的冲击最大^[17-18],所以下文仿真计算中选取这 2 种故障进行分析。

3.2 仿真验证

在仿真模型中,以 5 km 为调节步长,在 30 ~ 110 km 范围内调整线路长度以改变线路参数。在每种线路长度下 1 个周期内间隔 1 ms 进行一次实验,得到 320 组故障后一次电流和实际应该选择的虚拟

制动电流采样阈值的数据样本进行神经网络训练。

从 320 个数据样本中选取 200 个样本作为训练样本,其他 120 个样本作为测试样本。采用典型的 3 层网络($5 \times 4 \times 1$),结果如图 8 所示。

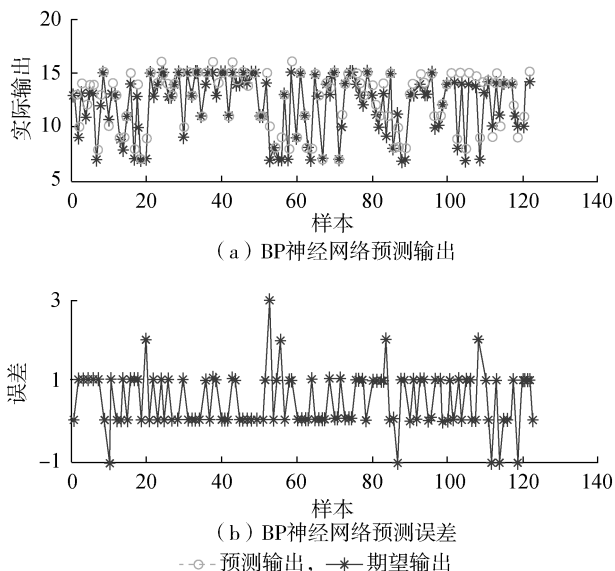


图 8 遗传算法-BP 神经网络测试结果

Fig.8 Testing results of GA-BP neural network algorithm

由于阈值只要小于固定阈值、大于实际的虚拟制动采样值的阈值就可以满足改进要求,所以计算准确率时只要误差不出现负值就可以认为预测准确,由此可以得到上述训练结果的准确率为 95.93%,若增加 1 个或者 2 个点的裕度,则可以说明测试结果的准确率接近 100%,这样既改进了固定阈值的裕度过大问题,也保证了一定的可靠性。

本文选取的输电线路长度为 30 km,在 0.3 ~ 0.318 s 之间每隔 2 ms 选取共 10 个在 K_2 处发生 A 相短路故障的时刻进行仿真分析,结果如表 1 所示。

表 1 仿真结果

Table 1 Simulative results

故障时刻/s	神经网络输出阈值	提前时间/ms
0.300	16	0
0.302	13	0.8
0.304	7	19.2
0.306	10	1.6
0.308	14	0.8
0.310	15	0
0.312	13	0.8
0.314	8	20.0
0.316	9	8.0
0.318	14	1.6

选取故障时刻 0.304 s 进行差动电流分析和保护开放验证,结果如图 9 所示。

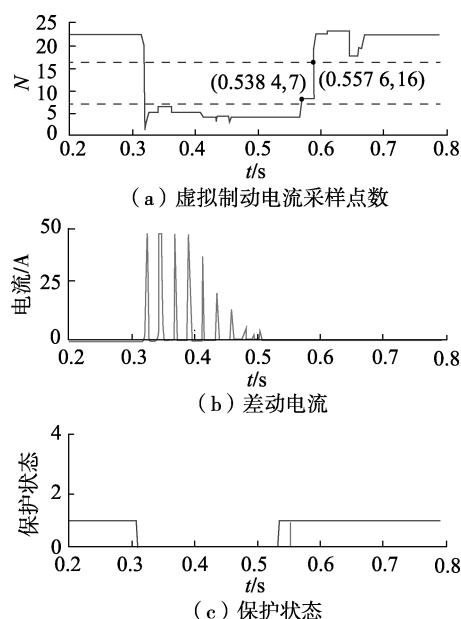


图9 0.304 s时刻发生区外故障时的保护动作情况

Fig.9 Operation of protection when external fault occurs in 0.304 s

由图9可知,在0.304 s时刻发生区外故障的情况下,经过6.4 ms的线性传变区后电流互感器开始饱和,利用时差法识别出故障为区外故障,在0.310 4 s时刻闭锁差动保护。如果选取固定门槛值16,则在0.557 6 s时刻电流互感器退出饱和并开放差动保护;如果根据一次电流自适应地选择门槛值为7,则在0.538 4 s时刻检测出电流互感器退出饱和并开放保护,与选择固定门槛值的情况下相比,提前了19.2 ms开放保护。

由图9和表1可知,利用实时数据,根据神经网络计算得到的门槛值判断饱和情况能够在保证可靠性的前提下有效缩短保护闭锁时间。

为了验证发生区外转区内故障时本文方法的动作情况,本文选取在0.304 s时刻点 K_2 发生A相瞬时区外短路故障、在0.45 s时刻点 K_1 处发生区内短路故障的情况进行研究,保护开放情况如图10所示。在0.304 s时刻发生区外故障,经过6.4 ms的线性传变区后电流互感器开始饱和,利用时差法识别为区外故障,在0.310 4 s时刻闭锁差动保护;在0.45 s时刻区外故障转为区内故障,由于虚拟制动电流法存在小于1个周期的延时,如果选取固定门槛值16,则在0.464 8 s时刻检测出电流大于虚拟制动电流阈值的采样点超过门槛值,此时开放差动保护动作;如果采用根据一次电流得到的最低门槛值7,则可在0.456 8 s时刻检测出电流大于虚拟制动电流阈值的采样点超过门槛值,此时开放差动保护并动作,与选择固定门槛值的情况下相比,提前了8 ms开放保护。

为了进一步验证本文方法的有效性,以IEEE 3

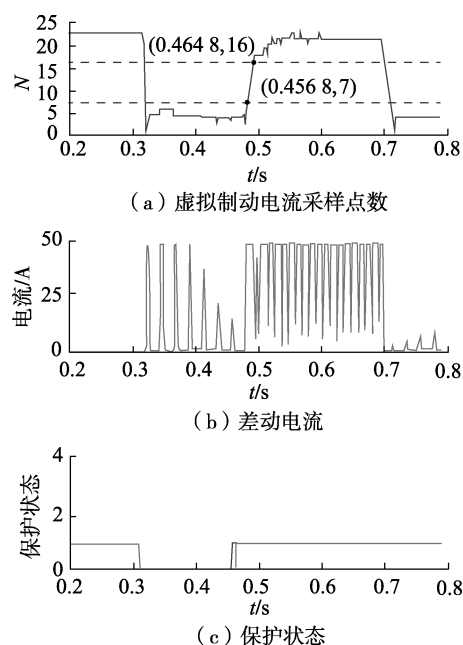


图10 发生转换性故障时的保护动作情况

Fig.10 Operation of protection when external fault transfers to internal fault

机9节点系统为例进行说明。仿真系统结构图如图11所示。图中,ETA₁为电子式互感器,TA₁为传统电磁式互感器,点 K_1 为区内故障位置,点 K_2 为区外故障位置。系统参数见附录。

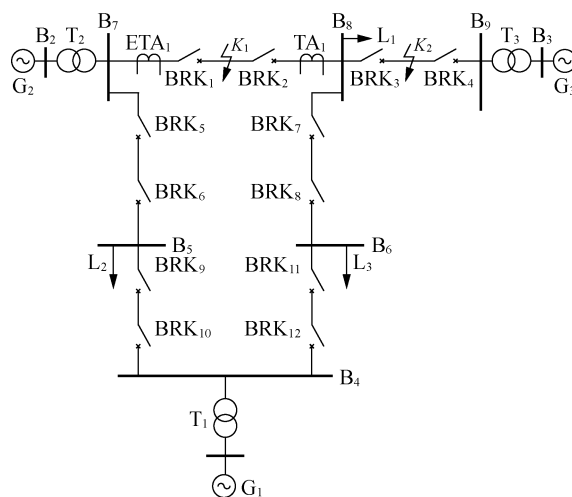


图11 IEEE 3机9节点系统仿真图

Fig.11 Simulation diagram of IEEE 3-generator 9-bus system

仿真过程与前文的双端系统类似,分别在点 K_2 设置不同的故障类型,TA₁饱和时保护的开放情况如表2所示。针对转换性故障,假设点 K_2 在不同时刻发生A相接地和三相短路故障,点 K_1 在7.15 s发生区内故障,仿真结果分别如表3、4所示。

上述结果表明,本文方法比固定开放门槛值的方法更具有灵活性,能够有效地缩短保护闭锁的时间,特别在发生转换性故障时能够更加迅速地开放保护动作,将区内故障切除,增加了差动保护的灵

敏性。

表 2 发生区外故障且 TA_1 饱和时的仿真结果

Table 2 Simulative results of external fault with TA_1 saturation

故障类型	线性区大小/ms	神经网络输出门槛值	保护开放情况	保护动作情况
AG	12.4	8	闭锁	正确动作
BG	11.8	9	闭锁	正确动作
CG	12.2	8	闭锁	正确动作
AB	9.5	11	闭锁	正确动作
ABG	10.8	10	闭锁	正确动作
ABC	7.2	13	闭锁	正确动作

表 3 点 K_2 发生 A 相接地故障后转区内故障时的仿真结果

Table 3 Simulative results when phase-A grounding fault at K_2 transfers to external fault

故障时刻/s	神经网络输出门槛值	保护开放时间/s		保护开放提前时间/ms	保护动作情况
		本文方法	传统方法		
7.000	12	7.177 9	7.184 5	7	正确动作
7.002	13	7.179 5	7.184 5	5	正确动作
7.004	11	7.177 9	7.186 2	8	正确动作
7.006	7	7.167 9	7.184 5	17	正确动作
7.008	9	7.171 6	7.184 9	13	正确动作
7.010	12	7.178 8	7.185 4	7	正确动作
7.012	13	7.181 8	7.186 8	5	正确动作
7.014	10	7.175 6	7.185 6	10	正确动作
7.016	6	7.166 2	7.184 5	18	正确动作
7.018	8	7.171 2	7.186 2	15	正确动作

表 4 点 K_2 发生三相短路故障后区外故障区内故障时的仿真结果

Table 4 Simulative results when three-phase short circuit fault at K_2 transfers to external fault

故障时刻/s	神经网络输出门槛值	保护开放时间/s		保护开放提前时间/ms	保护动作情况
		本文方法	传统方法		
7.000	11	7.177 9	7.187 9	10	正确动作
7.002	12	7.179 5	7.187 9	8	正确动作
7.004	10	7.176 2	7.187 9	11	正确动作
7.006	6	7.171 2	7.189 5	18	正确动作
7.008	7	7.166 2	7.183 5	17	正确动作
7.010	11	7.172 9	7.182 9	10	正确动作
7.012	13	7.177 9	7.184 9	7	正确动作
7.014	10	7.171 2	7.182 9	12	正确动作
7.016	7	7.166 2	7.183 5	17	正确动作
7.018	8	7.174 9	7.187 9	15	正确动作

4 结论

本文针对现有的时差法正确识别区外故障后闭锁差动保护期间,若发生区内故障而导致差动保护延时动作的问题,研究了电流互感器的传变特性,分析了虚拟制动法检测饱和和开放差动保护存在的不足,从电流互感器的传变特性分析了与电流互感器饱和程度相关的因素,根据一次电流情况自适应调节保护开放的门槛值,通过神经网络对实验数据的训练得到的故障后一次电流特征与门槛值的映射关系。仿真验证表明,该方法能够有效缩短闭锁保护

的时间,提高了速动性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 程利军,蔡敏,唐涛,等. 西门子微机母线保护及其发展[J]. 电力系统自动化,2004,28(10):91-96.
CHENG Lijun, CAI Min, TANG Tao, et al. Development of siemens microcomputer-based bus protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 91-96.
- [2] 何奔腾,马永生. 电流互感器饱和对母线保护的影响[J]. 继电器,1998,32(2):16-20,26.
HE Benteng, MA Yongsheng. The influence of current transformer on bus protection[J]. Relay, 1998, 32(2): 16-20, 26.
- [3] 陈丽艳,何奔腾,钱国明,等. 基于二次电流下降的电流互感器饱和判别方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(14):59-63.
CHEN Liyan, HE Benteng, QIAN Guoming, et al. Detection method for current transformer saturation based on the dropping of the secondary current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 59-63.
- [4] 张新刚,王泽忠,徐春丽,等. 差分法判定电流互感器饱和的改进措施[J]. 华北电力大学学报,2005,32(5):1-6.
ZHANG Xingang, WANG Zezhong, XU Chunli, et al. Improvements for CT saturation discrimination with difference method[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(5): 1-6.
- [5] 魏传锋,王浚. 黑箱建模方法在环境模拟试验中的应用[J]. 航天器环境工程,2005,22(4):204-206.
WEI Chuanfeng, WANG Jun. Application of the black box model in environment simulation test[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2005, 22(4): 204-206.
- [6] 曹豫宁,李永丽,张兴华,等. 基于小波变换的电流互感器饱和和实时检测新判据[J]. 电力系统自动化,2001,25(10):27-30.
CAO Yuning, LI Yongli, ZHANG Xinghua, et al. A new on-line criterion for current transformer saturation based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 27-30.
- [7] 李岩,陈德树,张哲,等. 鉴别 TA 饱和的改进时差法研究[J]. 继电器,2001,29(11):1-4,8.
LI Yan, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. Research of the improved time difference method to distinguish TA 's saturation[J]. Relay, 2001, 29(11): 1-4, 8.
- [8] 王志鸿,郑玉平,贺家李. 通过计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力系统及其自动化学报,2000,12(5):19-24.
WANG Zhihong, ZHENG Yuping, HE Jiali. A algorithm to distinguish current transformer's saturation by calculating the harmonics ratio of branch current[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2000, 12(5): 19-24.
- [9] 李丽,都洪基,刘林兴,等. 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 Hongji, LIU Linxing, et al. Research on confirming CT's saturation in busbar protection by calculation harmonic ratio[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 69-72.
- [10] 杨恢宏,谢百煌,毕大强,等. 基于虚拟制动电流采样点差动的 CT 饱和和识别方法[J]. 继电器,2006,34(13):50-53.
YANG Huihong, XIE Baihuang, BI Daqiang, et al. Using the sampling differential protection based on the constructed restraint current to identify CT saturation[J]. Relay, 2006, 34(13): 50-53.
- [11] DOS SANTOS E M, CARDOSO G, JR FARIAS P E, et al. CT satu-

- ration detection based on the distance between consecutive points in the plans formed by the secondary current samples and their difference-functions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 29-37.
- [12] 毕大强,冯存亮,葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 184-190.
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.
- [13] 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.
- [14] 刘益青,高伟聪,王成友,等. 基于差电流半周积分特征的电流互感器饱和识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2889-2895.
LIU Yiqing, GAO Weicong, WANG Chengyou, et al. Detection method for current transformer saturation based on characteristic of differential current by half-cycle integral algorithm[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2889-2895.
- [15] 杨焕章,王兴国,周泽昕,等. 一种利用电流突变量采样值的电流互感器饱和识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3574-3579.
YANG Huanzhang, WANG Xingguo, ZHOU Zexin, et al. A CT saturation identification method using sampled current fault component data[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3574-3579.
- [16] 李松,刘力军,解永乐. 遗传算法优化BP神经网络的短时交通流混沌预测[J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1581-1585.
LI Song, LIU Lijun, XIE Yongle. Chaotic prediction for short-term traffic flow of optimized BP neural network based on genetic algorithm[J]. Control and Decision, 2011, 26(10): 1581-1585.
- [17] TZIOUVARAS D A. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 62-70.
- [18] 唐宝锋,许庆强,范辉. 基于数字混合仿真的电网一次时间常数计算方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 110-115.
TANG Baofeng, XU Qingqiang, FAN Hui. A calculation method for primary time constant of power grids based on digital hybrid simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 110-115.
- [19] 李艳鹏,侯启方,刘承志. 非周期分量对电流互感器暂态饱和的影响[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 15-18.
LI Yanpeng, HOU Qifang, LIU Chengzhi. Influence of non-periodic components on transient saturation of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 15-18.

作者简介:



游步新

游步新(1975—),男,重庆人,博士研究生,主要研究方向为智能电网保护与控制(**E-mail**:cqybx@foxmail.com);

卜京(1981—),男,江苏南京人,讲师,博士,通信作者,研究方向为智能电网保护与控制(**E-mail**:bujing30@foxmail.com);

殷明慧(1978—),男,江苏南京人,副教授,博士,研究方向为分布式电源运行与控制。

Improved identification of CT saturation based on transient current characteristics

YOU Buxin, BU Jing, YIN Minghui

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The CT (Current Transformer) saturation may lead to the misoperation of differential protection when external fault occurs in power system. The common solutions select the fixed threshold to unblock the differential protection and ignore the effect of the differential current distortion degree, so the threshold is larger under the less saturation degree, which causes longer protection delay. In order to solve this problem, a method based on transient current characteristics is proposed to identify CT saturation. Based on the identification of CT saturation by constructed restraint current, the CT transfer characteristics are analyzed to obtain the relationship among the CT saturation, primary current and its differential coefficient. The mapping relationship between the primary current characteristics and optimal threshold is established by BP neural network, and the threshold to unblock the differential protection is adaptively obtained to reduce the protection blocking time. The simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: current transformers; saturation; constructed restraint current; neural networks; differential protection; relay protection

附录

表 A1 线路参数

<i>I</i> 侧母线	<i>J</i> 侧母线	正序阻抗	正序充电电纳	零序电抗
B ₇	B ₈	0.0085+j0.072	j0.0214	j0.2160
B ₈	B ₉	0.0320+j0.161	j0.0104	j0.3024
B ₅	B ₇	0.0320+j0.161	j0.0104	j0.4830
B ₄	B ₅	0.0100+j0.085	j0.0181	j0.2550
B ₆	B ₉	0.0390+j0.170	j0.0089	j0.5100
B ₄	B ₆	0.0170+j0.092	j0.0202	j0.2760

注：正序阻抗、正序充电电纳、零序电抗均为标么值。

表 A2 两绕组变压器参数标么值

<i>I</i> 侧母线	<i>J</i> 侧母线	正序阻抗	零序电抗	连接方式
B ₂	B ₇	j0.0625	j0.0625	三角/星接地
B ₃	B ₉	j0.0586	j0.0586	三角/星接地
B ₁	B ₄	j0.0625	j0.0625	三角/星接地

注：正序阻抗、零序电抗均为标么值。

表 A3 发电机参数

发电机	额定容量/（ MV·A ）	功率因数	电压幅值	X_d	$X_{d'}$	X_q	$X_{q'}$
G ₁	247.5	—	1.040	0.1460	0.0608	0.0969	0.0969
G ₂	192	0.85	1.025	0.8958	0.1198	0.8645	01969
G ₃	128	0.85	1.025	1.3125	0.1813	1.2578	0.2500

注：电压幅值、 X_d 、 $X_{d'}$ 、 X_q 、 $X_{q'}$ 均为标么值。

表 A4 负荷参数

母线	母线类型	有功功率/MW	无功功率/Mvar
B ₈	PQ	100	35
B ₅	PQ	125	50
B ₆	PQ	90	30