

基于差流符号序列特征的变压器励磁涌流识别判据

翁汉琍^{1,2}, 梅瀚予^{1,2}, 郭祎达^{1,2}, 贾永波³, 李振兴^{1,2}, 黄景光^{1,2}

(1. 三峡大学 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网河南省电力公司信阳供电公司, 河南 信阳 464000)

摘要:变压器在空载合闸的过程中,会产生幅值较大的励磁涌流,如不采取相应的闭锁措施,将导致变压器差动保护误动作。针对该问题,提出了一种基于差流符号序列特征的变压器励磁涌流识别判据。该判据首先对差流序列进行符号化处理,根据符号序列中相关模式序列出现的比例,量化表征差流波形的特征,实现对励磁涌流和故障差流的识别。利用PSCAD/EMTDC仿真软件验证了所提判据在各类区内外故障和励磁涌流工况下,以及各类工况伴随电流互感器饱和时的有效性。

关键词:变压器差动保护;继电保护;励磁涌流;差流;符号序列;电流互感器饱和

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202203004

0 引言

变压器在空载合闸或者外部故障切除后的电压恢复过程中会产生励磁涌流,其数值可能达到额定电流的6~8倍^[1-2],易导致变压器差动保护误动作。

目前,励磁涌流识别方法主要分为基于电流量、电压量以及综合电流量和电压量的3类方法^[3-4]。基于电流量的励磁涌流识别方法除了传统的间断角原理以及2次谐波法外,还有波形相关性分析、波形正弦度的判别等基于电流波形特征的方法^[5]。基于电压量的励磁涌流识别方法有谐波电压制动方法等,该方法受系统阻抗大小的影响较大,整定较为复杂^[6]。综合电流量和电压量的励磁涌流识别方法包括磁通特性识别法^[7]等,由于变压器铁芯的电磁特性是非线性的,与仅依靠单一电气量的方法相比,该类励磁涌流识别方法对励磁涌流特征的描述更为准确,但具体的实现方法较为复杂^[8-10],电压量的采用也引入了电压互感器故障的风险。

目前,工程上采用较多的是2次谐波制动判据^[11]。2次谐波制动判据通过差流中2次谐波含量的大小识别励磁涌流,门槛值一般整定为15%,甚至更小。由于励磁涌流严重时,2次谐波含量会小于15%,按照已有的整定方案可能会出现误动,因此近年来广泛采用三相或门制动^[12]方案。但空载合闸于已存在绕组匝间短路故障的变压器时,由于相电流中既含有励磁涌流又含有故障电流,2次谐波含量较高,导致差动保护长时间误闭锁;同时由于大型变压器通常是速饱和变压器,磁通倍数很低,此时

励磁涌流的2次谐波含量很低,导致保护误动^[13];当变压器发生严重的故障时,由于电感和电容的谐振作用,故障差流中2次谐波含量升高,使得变压器差动保护延时动作^[14]。

为了有效识别励磁涌流,本文在传统间断角原理的基础上,采用符号序列比例法,通过对差流序列进行符号化处理,利用符号序列中特定符号模式出现的比例构成判据来辨识励磁涌流和故障差流;通过仿真和动模试验对所提判据的有效性进行验证。本文方法通过对故障差流序列进行符号化处理,能有效提取并量化电流互感器饱和影响下的涌流波形特征。

1 变压器励磁涌流和故障差流波形特征比较

在双侧电源双绕组的变压器模型中,以4 kHz的采样频率,按照每周期80个采样点,在区内故障和空载合闸2种工况下,采集变压器两侧电流互感器测量的二次电流形成差流 i_{cd} ,并按照式(1)进行归一化处理。

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: X_{norm} 为归一化后的数据; X 为差流采样值标幺值; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为数据窗内差流采样值标幺值的最大值和最小值。

归一化处理后的差流波形如图1所示。图中 i_{cd} 为标幺值,后同。

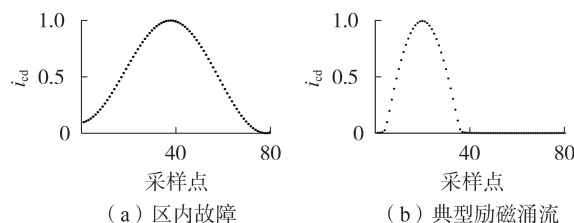


图1 归一化的差流波形

Fig.1 Waveforms of normalized differential current

收稿日期:2021-05-19;修回日期:2022-01-11

在线出版日期:2022-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077120)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077120)

由图1(a)可见,发生区内故障时,1个周期内有一半的差流采样值(采样点5—45范围内)处于持续递增的阶段,而在剩余的采样区间内,差流采样值处于持续递减的阶段。由图1(b)可见,在典型励磁涌流工况下,1个周期内有很大比例的差流采样值(采样点38—80范围内)基本保持不变,而在剩余的采样区间内,约一半的差流采样值处于持续上升的状态,另一半的差流采样值处于持续下降的状态。通过比较2种工况下差流波形的特征可以发现:当发生区内故障时,在1个周期内差流波形呈正弦性变化特征,只存在连续上升或者连续下降这2种趋势;而空载合闸时,对应于励磁涌流波形中间断角的部分,差流波形中存在一定比例的采样值无明显变化的阶段,即1个周期内,差流波形存在连续上升、连续下降和基本保持不变这3个部分。若能通过3种不同的符号序列表征差流波形的变化趋势,则可更加明显地区分励磁涌流和故障差流的波形变化特征。

2 符号序列法及其改进

2.1 符号序列的定义

符号序列主要应用于脑电信号和机械信号的分析检测中^[15-20],电流信号的提取方式与它们较为相似。对于长度为 N 的差流信号采样值组成的序列 $I=\{I(1), I(2), \dots, I(k), \dots, I(N)\}$,其为非平稳随机信号,可以使用3种符号表示差流信号采样值的变化方向,如式(2)所示。

$$x(m)=\begin{cases} 0 & I(k+1)<I(k)-a \\ 1 & |I(k+1)-I(k)|\leq a \\ 2 & I(k+1)>I(k)+a \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I(k)$ 为第 k 个采样点处差流采样值的标么值; a 为阈值因子,可使相邻2个采样点之间的差流采样值差保留一定的误差裕度; $x(m)=0$ 、 $x(m)=1$ 、 $x(m)=2$ 分别表示相邻2个采样点的差流采样值呈现下降趋势、基本保持不变和呈现上升趋势,使用这3种符号表示序列 I 的变化方向。

对图1中2种工况下 i_{cd} 的采样值序列进行符号化处理后,得到差流采样符号序列如图2所示。

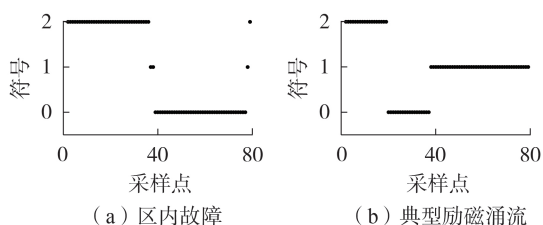


图2 差流采样符号序列图

Fig.2 Symbol sequence diagram of differential current

由图2可见,1个周期内,2种工况下的差流在符号序列分布上差异明显;发生区内故障时,符号0、2的占比很大,表明该工况下的差流波形主要呈持续

上升和持续下降这2种趋势;典型励磁涌流工况下,符号1的占比较大,接近半个周期,这是由间断角导致的,表明励磁涌流波形除了呈持续上升和持续下降这2种趋势,还存在较大比例的电流采样值基本保持不变。

2.2 符号序列法的改进

虽然采用3种单个符号可以表示差流变化的方向,但是单个符号序列只能表示相邻2个采样点间的差流幅值的变化,还存在以下问题需要解决。

首先,对于波形连续变化的差流,波形转折处的若干采样点间的差流值相差不大,不能清晰表征波形的真实信息,容易导致误差。因此为了揭示差流采样符号序列的时序和结构规律,使用滑动窗的方法将差流采样符号序列中的元素两两结合,构造宽度为2的9种符号向量模式,即模式00、01、02、10、11、12、20、21、22。其中,模式00、11、22可分别表示差流波形持续下降、基本保持不变和持续上升这3种状态;其他6种模式表示差流波形处于2种状态之间的转折部分,如图3所示。

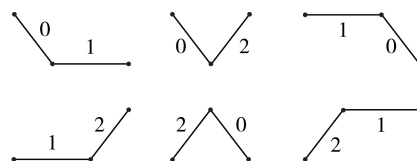


图3 转折模式示意图

Fig.3 Schematic diagram of transition mode

根据采样得到的1个周期内的符号向量模式可知,6种转折模式在1个周期内的占比很少且不能有效反映差流波形的变化特征,因此可将它们视为无效模式并舍弃,只保留00、11、22这3种模式来计算模式11出现的比例 r_{11} ,如式(3)所示。

$$r_{11} = \frac{N_{11}}{N_{00} + N_{11} + N_{22}} \quad (3)$$

式中: N_{00} 、 N_{11} 和 N_{22} 分别为模式00、11、22出现的次数。

由于舍弃了转折模式,算法的抗异常数据能力得到了提高。例如某个模式由模式10突变到模式12,由于两者均为转折模式,都会被舍弃,不会对结果造成明显影响;同时假设由于数据的突变使得模式02转化模式00或者模式00转化成模式02,模式00的个数相应地增加或者减少1,模式00、11、22的总数也相应地增加或者减少1,但是由于1个周期内的模式总数较大,当分子与分母同时增加或者减少1时,对结果影响很小。

其次是阈值因子 a 的确定。式(1)中, a 通常取序列的均方根,能够给相邻2个采样点间符号的判定保留一定的裕度,使得符号序列能够更好地挖掘差流波形内部的模式规律。而经过归一化处理的差

流波形中,相邻2个采样点处的差流采样值绝大多数变化幅度很小,如果阈值因子过大,则会导致符号全部为1。

以正弦波为例,分别在采样频率2、4、10 kHz下,分析相邻两采样点间的差流采样值差值的绝对值(下文简称差值绝对值),结果如附录A表A1所示。由表可见,不同采样频率下,相邻采样点的差值绝对值不同,随着采样频率的增加,1个周期内的采样点数逐渐增加,相邻两采样点间的最大差值绝对值逐渐减小,采样频率为2、4、10 kHz时,最大差值绝对值分别为0.08、0.04、0.016 p.u.,所以随着采样频率的升高, a 的取值应逐渐减小。

本文中 a 的取值要考虑到典型励磁涌流工况下一次涌流中的间断部分和励磁涌流伴随电流互感器饱和工况下反向饱和的部分。因此,分别在采样频率2、4、10 kHz下,对1个周期内二次涌流中对应一次涌流间断部分的任意相邻两采样点的差值绝对值求均方根(下文简称差值绝对值均方根),结果如表1所示。表中,均方根为标么值。

表1 二次涌流间断部分的差值绝对值均方根

Table 1 Root mean square of absolute value of difference for discontinuous part of secondary inrush current

工况	采样频率/kHz	后半周期的差值绝对值均方根
典型励磁涌流	2	0.0009
	4	0.0005
	10	0.0001
励磁涌流伴随电流互感器饱和	2	0.0050
	4	0.0020
	10	0.0008

由表1可见,与典型励磁涌流工况相比,励磁涌流伴随饱和工况下,二次涌流间断部分相邻两采样点间的差值绝对值均方根较大,因此 a 的取值主要以励磁涌流伴随电流互感器饱和工况下的数据为基准,这样能够兼顾典型励磁涌流和励磁涌流伴随电流互感器饱和2种工况。通过对 a 赋予不同的值进行反复比较和验证可知,取表1中差值绝对值均方根的1.5倍作为 a 能有效区分差流波形的3种变化趋势。以采样频率为4 kHz为例,取 $a=0.002 \times 1.5=0.003$,生成的符号序列图能够较精确地反映差流波形变化的趋势,实现对波形特征的识别。需要说明的是,本文对差流采样值进行归一化处理后以二次涌流间断部分的差值绝对值均方根作为基准对 a 进行整定。现有保护装置的模数(A/D)转换在对原始电流波形的采样、提取、量化过程中引入了量化误差,可能影响 a 对采样点变化模式的判别。而该量化误差主要由A/D转换器的位数决定,最大误差占比不超过0.2%(A/D转换器为8位)^[21]。当A/D转换器

位数较低(如8位),在某些极端情况如相邻两采样点先后出现正负误差时,采用本文整定所得的 a 可能不能正确识别两相邻采样点的差流变化模式,但根据图3,此种情况会被识别为转折模式而被舍弃。由于此种极端情况出现的概率小,因此被舍弃的部分占比很小,根据式(3)可知,最终的判据判别结果受到的影响很小。随着A/D转换器位数的增加(8位以上),即使考虑上述最严重的正负误差情况,相邻两采样点间的差值绝对值均小于本文所设定的阈值因子 a ,两采样点间的差流变化模式能够被正确判别。

3 基于差流符号序列特征的变压器励磁涌流识别判据

采集典型区内故障、区内故障伴随电流互感器饱和、励磁涌流叠加轻微故障、典型励磁涌流、励磁涌流伴随电流互感器饱和、对称性涌流以及区外故障伴随电流互感器饱和这7种工况下1个周期内的差流采样符号序列并对其进行符号化处理,结果如附录A表A2所示。在采样频率为4 kHz、 $a=0.003$ 的情况下,分别统计表A2所示的各种工况下差流采样符号序列中的模式00、11和22,并对模式11的比例 r_{11} 进行计算,结果如附录A表A3所示。结合表A2、A3可以看出:在区内故障伴随电流互感器饱和的工况下,差流波形出现畸变,存在凹陷的部分,但凹陷部分波形中任意相邻两采样点间的差流采样值差值明显。励磁涌流叠加轻微故障的工况下,差流波形是故障电流和励磁涌流波形的叠加,波形出现了轻微的畸变,存在尖顶波的特征,前半周期呈现持续上升的趋势,后半周期呈现持续下降的趋势,这与区内故障伴随电流互感器饱和的工况类似;经统计,该工况下,符号序列中的向量模式进行主要为模式00、22。综上所述,在设置的区内故障、区内故障伴随电流互感器饱和及励磁涌流叠加轻微故障工况下,差流波形只存在持续上升和持续下降这2种趋势,差流符号序列中模式11所占的比例均非常低,接近于0,导致 r_{11} 很小,分别为0.027、0.013、0.027。

在典型励磁涌流工况下,差流符号序列中模式11的比例升高到0.610,这表明在典型励磁涌流波形中,差流采样值基本保持不变的部分占比很大,与典型区内故障工况差异明显。进一步考虑电流互感器饱和的影响,一次涌流经饱和电流互感器传变后的波形在原本间断的部分产生了反向的电流,导致原本对应符号序列中值为1的元素转变为其他符号值,但是发生畸变的波形变化较为平缓,且由于阈值因子的存在,畸变波形中少量符号序列中值为1的元素发生了转换,导致模式11的比例略有下降。

通过对上述7种工况下的差流波形进行验证,发现无论电流互感器状态如何,发生区内故障时,差流的符号向量模式绝大多数为模式00、22,模式11极少;而励磁涌流中模式11占比较大。因此,模式11占1个周期内3种模式总数的比例可作为工况依据。对各类工况进行大量仿真分析,并考虑一定的裕度,设定门槛值 $r_{11,set}=0.2$ 。利用差流越限启动判据实时判别差流值;根据式(2)实时计算 r_{11} ,如果 $r_{11} > r_{11,set}$,则判定为励磁涌流或区外故障并闭锁差动保护,否则判定为区内故障,并开放差动保护使其动作。

4 仿真验证

利用PSCAD/EMTDC仿真平台搭建如附录A图A1所示的双侧电源供电的双绕组变压器仿真模型^[22-24],进行变压器空载合闸以及区内故障等工况下的仿真算例分析,主要参数如下:系统供电电压 $E_1=110\text{ kV}$ 、 $E_2=35\text{ kV}$,系统频率为50 Hz;变压器采用Y/△接线,其额定容量为100 MV·A,两侧额定电压分别为110、38.5 kV;电流互感器TA₁、TA₂采用J-A模型,变比分别为600 A/5 A、1500 A/5 A;仿真时长为1 s,采样频率为4 kHz, $r_{11,set}=0.2$;下文中给出的仿真结果均为归一化处理后的A相仿真结果。

1)算例1:空载合闸励磁涌流伴随电流互感器饱和。在 $t=0.32\text{ s}$ 时,变压器空载合闸,A相初相角为 0° ,变压器三相铁芯剩磁均为0,仿真结果如图4所示。

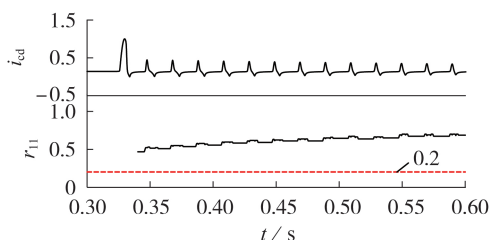


图4 算例1的仿真结果

Fig.4 Simulative results of Case 1

算例1中,由于电流互感器饱和,一次涌流中本应间断的部分经饱和电流互感器传变后,在二次涌流中出现反向波形,使得间断角减小甚至消失,该工况下,若采用基于传统间断角原理的判据,将发生误判,导致差动保护误动作。由图4可见,经饱和电流互感器传变后,二次涌流中的反向波形变化趋势平缓,利用选取的阈值因子 α 进行判别后,属于电流波形基本保持不变的部分,因此,整个仿真时长内,算例1的 r_{11} 持续大于 $r_{11,set}$,差动保护被可靠闭锁。

2)算例2:变压器区外故障伴随一侧电流互感器饱和。在 $t=0.32\text{ s}$ 时,变压器△侧区外发生三相接地故障,且伴随Y侧A相电流互感器饱和, i_{cd} 、 r_{11} 和

差流中2次谐波含量的仿真结果分别如图5和图6所示。

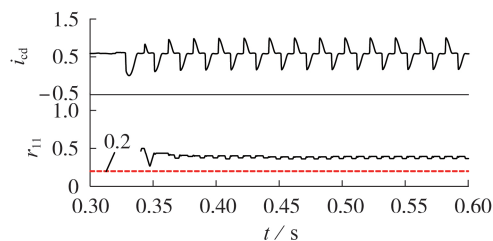


图5 算例2中 i_{cd} 、 r_{11} 的仿真结果

Fig.5 Simulative results of i_{cd} and r_{11} in Case 2

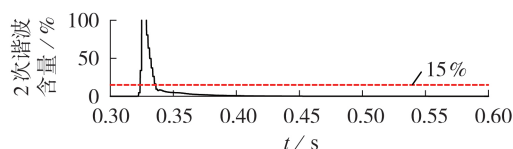


图6 算例2中差流的2次谐波含量的仿真结果

Fig.6 Simulative results of second harmonic content of differential current in Case 2

由图5可见,算例2中,单侧电流互感器的饱和在差动保护中引入了虚假差流,而虚假差流波形中存在间断的部分(对应于两侧电流互感器均不饱和、传变正确的阶段),该部分被识别为电流基本保持不变的部分。因此,根据差流计算的 r_{11} 一直大于 $r_{11,set}$,差动保护能被本文所提判据可靠闭锁。相比之下,在区外故障发生1个周期后,差流中的2次谐波含量就降低到15%的制动门槛之下,如图6所示,此时若采用2次谐波制动判据,则会导致差动保护发生误动作。

3)算例3:励磁涌流叠加匝间5%短路故障。在 $t=0.32\text{ s}$ 时,变压器空载合闸伴随Y侧A相绕组带匝间5%短路故障, i_{cd} 、 r_{11} 和差流中2次谐波含量的仿真结果分别如图7和附录A图A2所示。

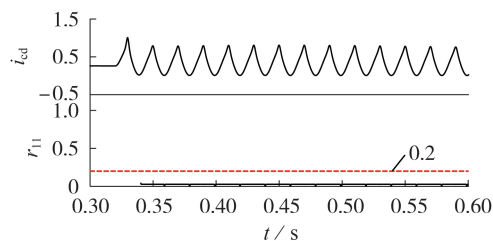


图7 算例3中 i_{cd} 、 r_{11} 的仿真结果

Fig.7 Simulative results of i_{cd} and r_{11} in Case 3

$t=0.32\text{ s}$ 时,变压器高压侧带轻微匝间故障空载合闸,尽管励磁涌流导致差流波形有别于典型的故障差流,但差流的变化趋势仍以持续上升和持续下降为主导,基本持续不变的部分极少,因此 r_{11} 一直小于 $r_{11,set}$,使差动保护能快速正确动作,如图7所示。由图A2可见,若采用2次谐波制动判据,在带故障

合闸后,由于励磁涌流的存在,差流中的2次谐波含量长时间维持在制动门槛值以上,在仿真时长内将持续误闭锁差动保护。

对空载合闸励磁涌流、对称性涌流、变压器区内故障伴随一侧电流互感器饱和工况进行仿真验证,仿真结果及分析见附录B。利用动模试验数据进一步验证本文所提判据的有效性,仿真结果及分析见附录C。

5 结论

本文基于励磁涌流和故障差流在间断角上的差异,利用改进符号序列比例法能够有效识别差流波形中电流基本保持不变部分的特点,提出了基于差流符号序列特征的变压器励磁涌流识别判据,并利用仿真和动模试验算例对判据的有效性进行了验证。结果表明本文所提判据能够正确区分励磁涌流和故障差流,并具有抗电流互感器饱和的能力,能有效防止因电流互感器饱和引发励磁涌流和区外故障情况下差动保护误动作,并避免区内故障伴随电流互感器饱和以及励磁涌流叠加绕组匝间故障情况下差动保护延迟动作。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 胡松,江亚群,黄纯. 基于偏度系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术,2018,42(6):1954-1959.
HU Song, JIANG Yaquin, HUANG Chun. Identification method of transformer inrush current based on skewness coefficient[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1954-1959.
- [2] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2010:166-194.
- [3] 胡松,江亚群,黄纯,等. 基于PWM波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):135-140.
HU Song, JIANG Yaquin, HUANG Chun, et al. Identification of inrush current based on characteristics of PWM waveform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 135-140.
- [4] 李斌,彭伍龙,姚斌,等. 基于复合环流与零序电流特征的换流变压器励磁涌流波形相关性识别方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(24):8027-8038,8239.
LI Bin, PENG Wulong, YAO Bin, et al. An algorithm of identifying inrush current of converter transformer based on waveform cross-correlation of composite circulation and zero sequence current characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8027-8038, 8239.
- [5] 王雪. 变压器励磁涌流特征空间综合识别方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):83-86.
WANG Xue. Synthetic transformer inrush identification based on characteristic space[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 83-86.
- [6] 马静,王增平,王政军. 基于网格曲线频率特性识别励磁涌流[J]. 电力自动化设备,2008,28(7):29-32,36.
MA Jing, WANG Zengping, WANG Zhengjun. Identify inrush current based on frequency characteristics of grille curve[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 29-32, 36.
- [7] 卢雪峰,王增平,徐岩,等. 模糊层次分析法在变压器励磁涌流识别中的应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):57-61.
LU Xuefeng, WANG Zengping, XU Yan, et al. Application of fuzzy analytical hierarchy process in transformer excitation inrush detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 57-61.
- [8] 宋九渊,符玲,熊思宇,等. 基于二阶泰勒系数的励磁涌流识别方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(3):1020-1030.
SONG Jiuyuan, FU Ling, XIONG Siyu, et al. Magnetizing inrush current identification method based on second-order Taylor derivative[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 1020-1030.
- [9] 葛宝明,于学海,王祥珩,等. 基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法[J]. 电力系统自动化,2004,28(7):44-48.
GE Baoming, YU Xuehai, WANG Xiangheng, et al. A novel equivalent instantaneous inductance based algorithm used to distinguish inrush currents for transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 44-48.
- [10] 尤夏,张艳霞. 波动误差结合峰-峰间距法识别变压器励磁涌流[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):36-40,45.
YOU Xia, ZHANG Yanxia. Recognition of transformer inrush current based on combination of fluctuation error and peak-to-peak space method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 36-40, 45.
- [11] 周念成,李春艳,王强钢. 基于多变量多尺度熵的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电工技术学报,2018,33(15):3426-3436.
ZHOU Niancheng, LI Chunyan, WANG Qianggang. An algorithm to identify transformer inrush currents based on multivariate multiscale sample entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3426-3436.
- [12] 王业,袁宇波,高磊,等. 基于FSAD及非周期分量的励磁涌流鉴别算法[J]. 电工技术学报,2015,30(21):127-135.
WANG Ye, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. A algorithm to identify magnetizing inrush current based on FSAD and aperiodic components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 127-135.
- [13] 黄少锋,申洪明,刘欣,等. 基于能量信息的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(18):110-113.
HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, LIU Xin, et al. A novel identification criterion for inrush current based on energy information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 110-113.
- [14] 王业,陆于平,蔡超,等. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):702-711.
WANG Ye, LU Yuping, CAI Chao, et al. A magnetizing inrush identification method applying adaptive data-window currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 702-711.
- [15] 杜飞. 基于符号序列熵和詹森香农熵的脑电节律信号分析[D]. 南京:南京邮电大学,2017.
DU Fei. Sign series entropy and JSD analysis based on electroencephalogram rhythm signal[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [16] 杜飞,王世通,戴加飞,等. 少年与中年脑电信号的多尺度符号序列熵分析[J]. 北京生物医学工程,2016,35(6):599-603,608.
DU Fei, WANG Shitong, DAI Jiafei, et al. Multiscale sign series entropy analysis based on the young and middle-aged electroencephalogram[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2016, 35(6): 599-603, 608.
- [17] 潘峥嵘,谯自健,张宁. 基于符号序列熵的自适应随机共振的微弱信号检测[J]. 计量学报,2015,36(5):496-500.
PAN Zhengrong, QIAO Zijian, ZHANG Ning. Weak signal detection of adaptive stochastic resonance based on Shannon entropy of symbolic series[J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36

- (5):496-500.
- [18] 张豪,陈黎飞,郭躬德. 基于符号熵的序列相似性度量方法[J]. 计算机工程,2016,42(5):201-206,212.
ZHANG Hao, CHEN Lifei, GUO Gongde. Sequence similarity measurement method based on symbol entropy[J]. Computer Engineering, 2016, 42(5): 201-206, 212.
- [19] 孙德建,王冰,胡雄,等. 基于改进符号序列熵的岸桥齿轮箱退化特征提取研究[J]. 机电工程,2020,37(2):120-125.
SUN Dejian, WANG Bing, HU Xiong, et al. Degradation feature extraction of port crane gearbox based on improved symbolic sequence entropy retraction[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(2): 120-125.
- [20] 陈臻璋,胡雄,王冰. 基于改进符号序列熵的滚动轴承退化特征提取[J]. 轴承,2020(3):51-55.
CHEN Zhenyi, HU Xiong, WANG Bing. Degradation feature extraction of rolling bearings based on improved symbolic sequence entropy[J]. Bearing, 2020(3): 51-55.
- [21] 于群,曹娜. 电子系统微机继电保护[M]. 北京:机械工业出版社,2019:13-14.
- [22] 翁汉琨,王胜,饶丹青,等. 后续换相失败引发的换流变零序差动保护误动场景分析及策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):64-70.
WENG Hanli, WANG Sheng, RAO Danqing, et al. Analysis of mal-operation scenarios of zero-sequence differential protection of converter transformer caused by subsequent commutation failure and corresponding strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 64-70.
- [23] 翁汉琨,陈皓,万毅,等. 基于巴氏系数的变压器励磁涌流和故障差流识别新判据[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(10):113-122.
WENG Hanli, CHEN Hao, WAN Yi, et al. A novel criterion to distinguish inrush current from fault current based on the Bhattacharyya coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 113-122.
- [24] 周全,武霁阳,李海峰. 高压直流线路区内外故障判别新方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):123-128,148.
ZHOU Quan, WU Jiyang, LI Haifeng. In-out-zone fault identification for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 123-128, 148.

作者简介:



翁汉琨

翁汉琨(1980—),女,教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**: honey_weng@163.com);

梅瀚予(1998—),男,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**: 1669252906@qq.com);

郭祎达(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**: 286826552@qq.com)。

(编辑 任思思)

Identification criterion of transformer magnetizing inrush current based on symbol sequence characteristic of differential current

WENG Hanli^{1,2}, MEI Hanyu^{1,2}, GUO Yida^{1,2}, JIA Yongbo³, LI Zhenxing^{1,2}, HUANG Jingguang^{1,2}

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. Xinyang Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Xinyang 464000, China)

Abstract: In the process of no-load closing of transformer, the magnetizing inrush current with large amplitude will be generated. If the corresponding locking measures are not taken, the transformer differential protection will be misoperated. In order to solve this problem, an identification criterion of transformer magnetizing inrush current based on the symbol sequence characteristics of differential current is proposed. This criterion firstly symbolizes the sequence of differential current, and then quantifies the characteristics of differential current waveform according to the proportion of correlation pattern sequence in the symbol sequence, so as to realize the identification of magnetizing inrush current and the differential fault current. PSCAD/EMTDC simulation software is used to verify the validity of the proposed criteria under various types of in-area and out-of-area faults and magnetizing inrush current conditions, as well as various types of conditions accompanied by current transformer saturation.

Key words: transformer differential protection; relay protection; magnetizing inrush current; differential current; symbol sequence; current transformer saturation

附录 A

表 A1 各采样频率下相邻采样点间的差值绝对值

Table A1 Absolute value of differential current difference between adjacent sampling points at each sampling frequency

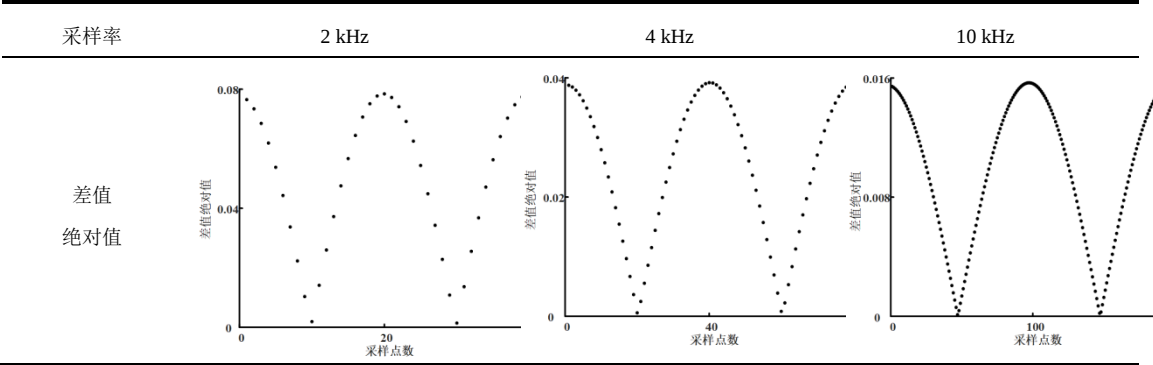


表 A2 差流采样序列及其符号序列图

Table A2 Differential current sampling sequence and its symbolic sequence diagram

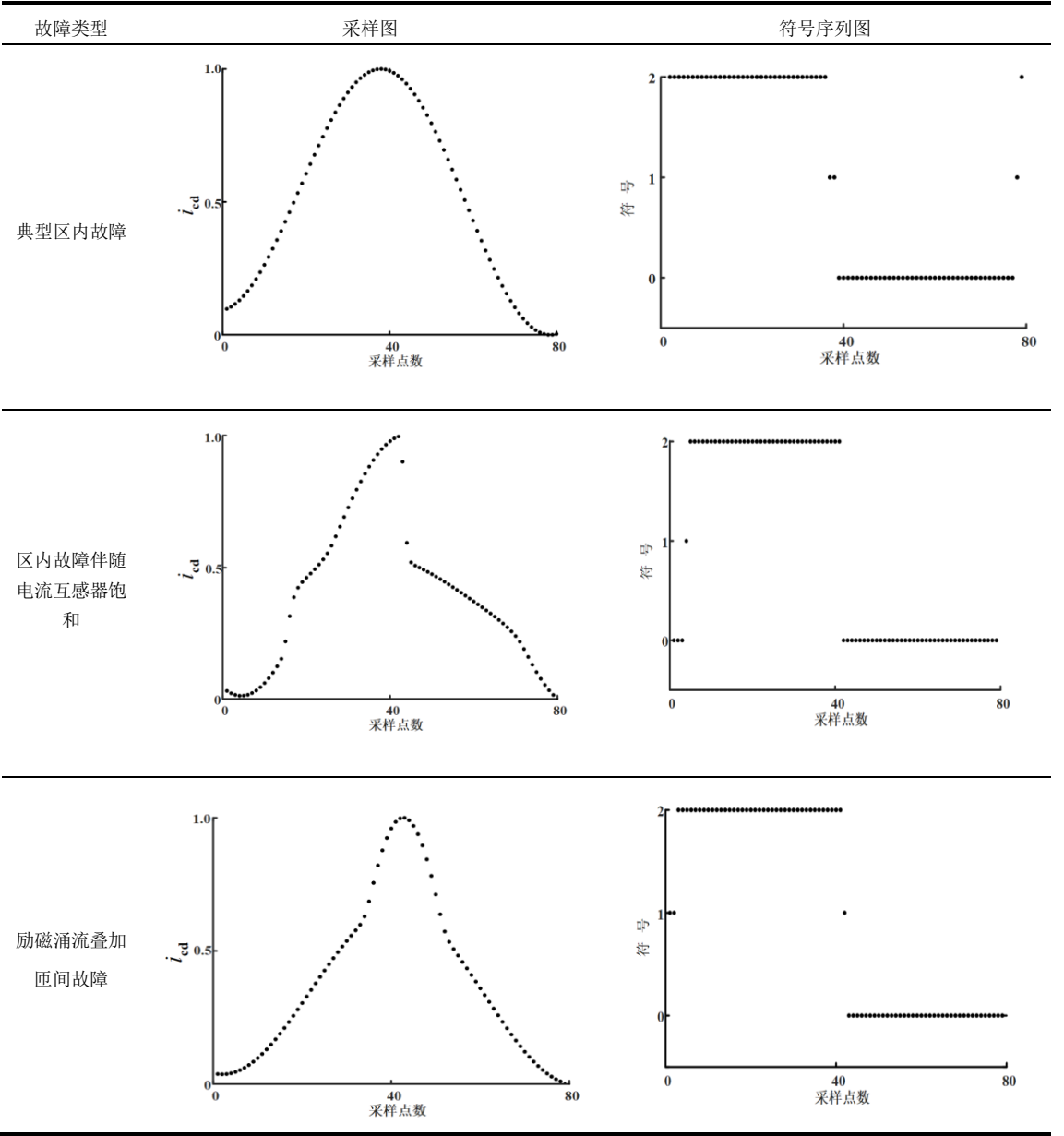


表 A2 (续)

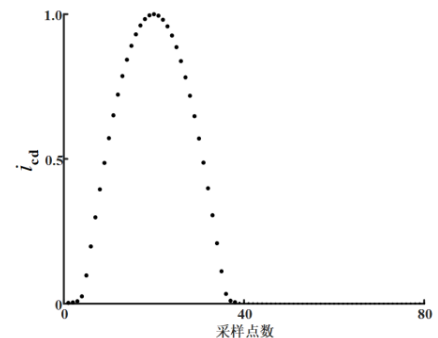
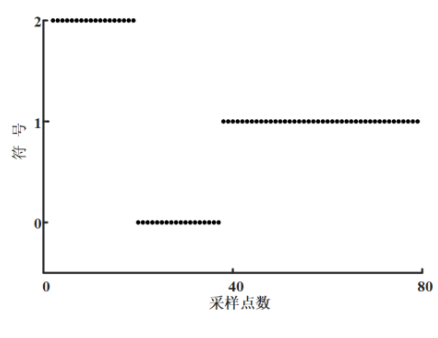
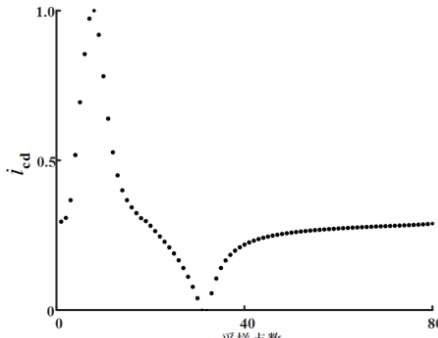
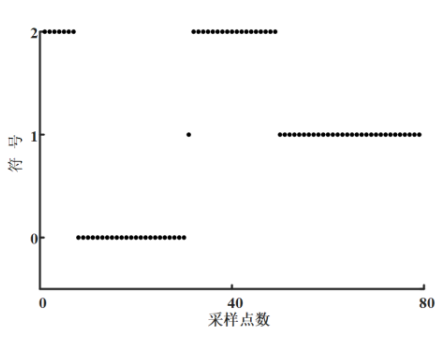
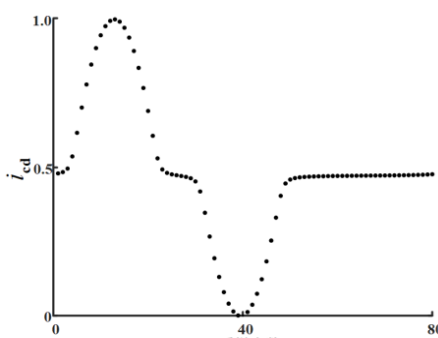
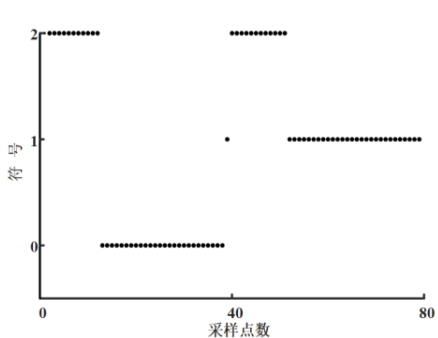
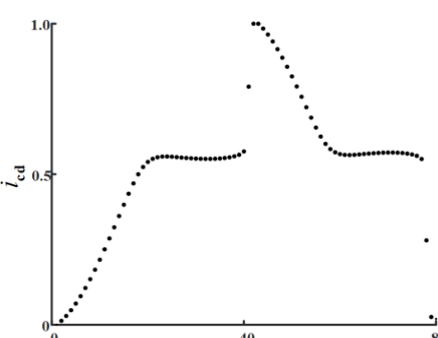
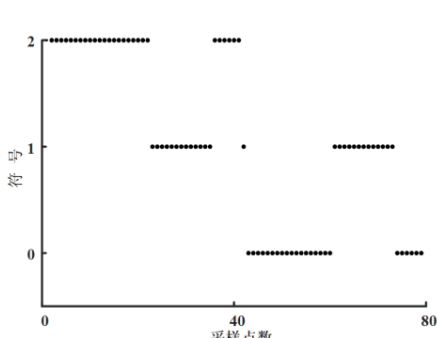
故障类型	采样图	符号序列图
典型励磁涌流		
涌流伴随电流互感器饱和		
对称性涌流		
区外故障伴随电流互感器饱和		

表 A3 模式分布
Table A3 Pattern distribution

故障类型	频率/kHz	模式分布			r_{11}
		00	11	22	
典型区内故障	4	37	2	36	0.027
区内故障伴随电流互感器饱和	4	39	1	36	0.013
励磁涌流叠加匝间故障	4	36	2	37	0.027
典型励磁涌流	4	16	47	14	0.610
励磁涌流伴随电流互感器饱和	4	22	34	18	0.460
对称性涌流	4	22	30	21	0.411
区外故障伴随电流互感器饱和	4	20	28	24	0.389

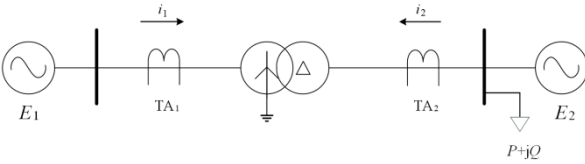


图 A1 双侧电源双绕组变压器模型
Fig.A1 Model of double-sided power supply and dual-winding transformer

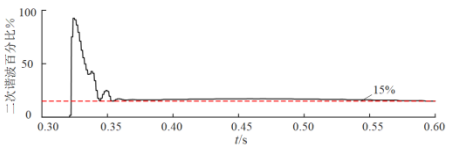


图 A2 算例 3 中差流的 2 次谐波含量
Fig.A2 Second harmonic content of differential current in Case 3

附录 B

1) 算例 B1: 单向励磁涌流。

在 $t=0.32$ s, 变压器空载合闸, A 相初相角为 0° , 变压器三相铁芯剩磁均为 0, 结果如图 B1 所示。图中, i_{cd} 、 r_{11} 均为标么值, 后同。

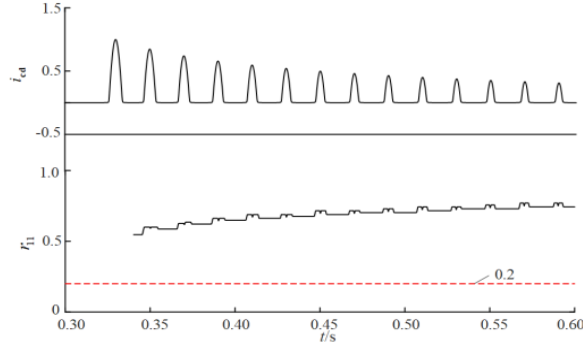


图 B1 A 相励磁涌流及 r_{11} 的波形

Fig.B1 Waveform of phase-A magnetizing inrush current and r_{11}

由图 B1 可以看出: 空载合闸时, 励磁涌流中存在着尖顶波和间断角, 并且随着时间的变化, 间断角逐渐变大, 导致符号向量模式 11 的比例也随之升高, r_{11} 值始终高于判据门槛值 $r_{11.set}$, 保护被持续闭锁, 不会导致误动作。

2) 算例 B2: 对称性励磁涌流。

在 $t=0.333$ s 时, 变压器空载合闸, A 相初相角为 -120° , 变压器三相铁芯剩磁均为 0, 仿真结果如图 B2 所示。

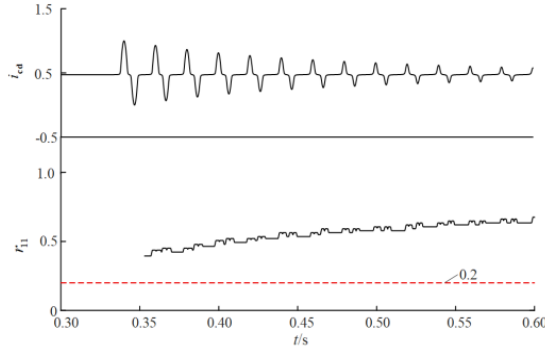


图 B2 A 相对称性励磁涌流及 r_{11} 的波形

Fig.B2 Waveform of phase-A symmetrical magnetizing inrush current and r_{11}

对于算例 B2 中的对称性涌流, 其间断角较之典型单向涌流时变小, 在 1 个周期内, 电流基本保持不变部分所占的比例略有下降, 但仍然高于设定的判据门槛值。随着涌流逐渐衰减, 电流中基本保持不变的部分将增多, r_{11} 也随之增大, 始终高于 $r_{11.set}$, 可靠闭锁保护。

3) 算例 B3: 在 $t=0.32$ s 时, 变压器 Δ 侧出口发生三相接地故障, 仿真结果见图 B3。

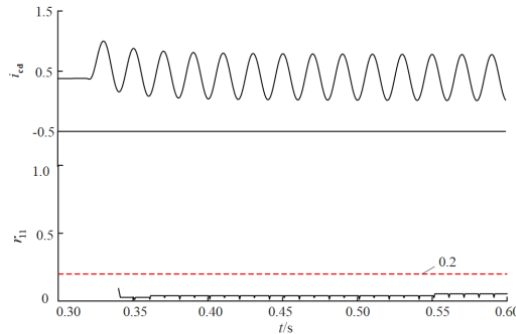


图 B3 变压器 Δ 侧出口三相接地故障时 A 相差流及 r_{11} 的波形

Fig.B3 Waveform of phase-A differential current and r_{11} when three-phase grounding fault occurs at outlet of transformer's Δ side

由算例 B3 可以看到，故障波形几乎不存在电流基本保持不变的区域，故障发生的第 1 个周期内，差流波形中模式 11 的占比就低于门槛值 $r_{11.set}$ ，使得保护快速动作。

4) 算例 B4: 变压器区内故障伴随一侧电流互感器饱和。

在 $t=0.32$ s 时，变压器 Δ 侧区内发生三相接地故障，并且伴有 Y 侧 A 相电流互感器饱和，仿真结果如图 B4、B5 所示。

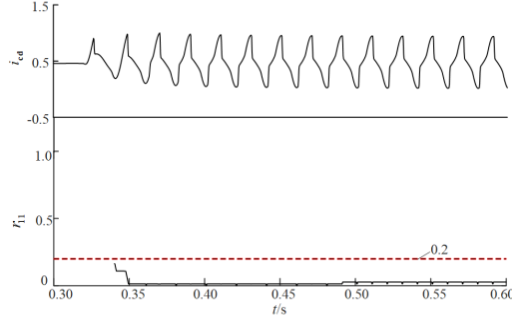


图 B4 区内故障伴随一侧电流互感器饱和时 A 相差流波形及 r_{11} 的波形

Fig.B4 Waveform of phase-A differential current waveform and r_{11} when internal fault is accompanied by current transformer saturation on one side

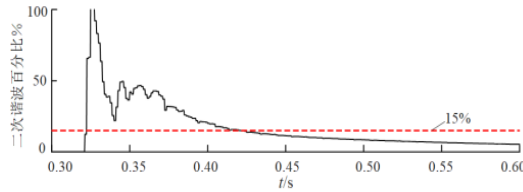


图 B5 区内故障伴随一侧电流互感器饱和时差流 2 次谐波含量

Fig.B5 Second harmonic content in differential current when internal fault is accompanied by current transformer saturation on one side

由图 B4、B5 可以看出，由于单侧电流互感器饱和，差流波形中存在波形失真的部分，影响差流中 2 次谐波含量，在 $t=0.42$ s 前，2 次谐波含量持续高于 15% 的制动门槛，使得保护被误制动，若使用传统的 2 次谐波制动判据，会造成保护延时故障发生 5 个周期才能动作。而使用本文所提的判据后， r_{11} 在故障后 1 个周期内低于门槛值 $r_{11.set}$ ，使保护能够快速动作。

附录 C

利用动模试验数据进一步验证所提判据的有效性,本文中动模试验为模拟额定容量为 500 kV·A,变比 500kV/220kV 的三相变压器,使用的是 Y/△接线方式连接的 3 个额定容量为 2 kV·A,额定电压比为 462V/200V 的单相变压器。2 个模型在时间常数、瞬态电抗、励磁电流、磁路上均等效。动态试验系统的模型如图 C1 所示。

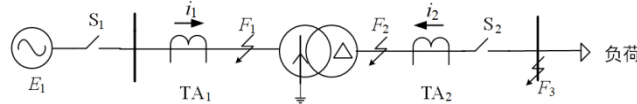


图 C1 动态模拟试验模型图

Fig.C1 Model diagram of dynamic simulation experiment

该模拟试验系统频率为 50 Hz,采样频率为 4 kHz,即每周期采样 80 个点,记录下干扰前后共 550 个采样点的电流数据。

1) 试验算例 1: 匝间故障。

在第 150 个采样点的对应时刻,变压器 Y_0 侧发生 B 相 4.35%绕组短路故障。

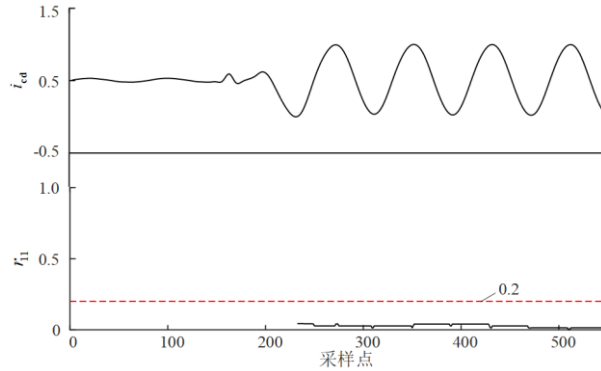


图 C2 B 相匝间故障下的差流及 r_{11} 波形

Fig.C2 Waveform of differential current and r_{11} under phase-B turn-to-turn fault condition

由图 C2 可以看出,在第 150 个采样点时出现故障,在对 B 相差流波形进行符号序列比例法处理之后, r_{11} 的值在故障后一周内即接近于 0,远小于阈值 0.2。因此,在故障发生之后,保护便能快速正确动作。

2) 试验算例 2: 空载合闸(单向典型涌流)。试验结果如图 C3 所示。

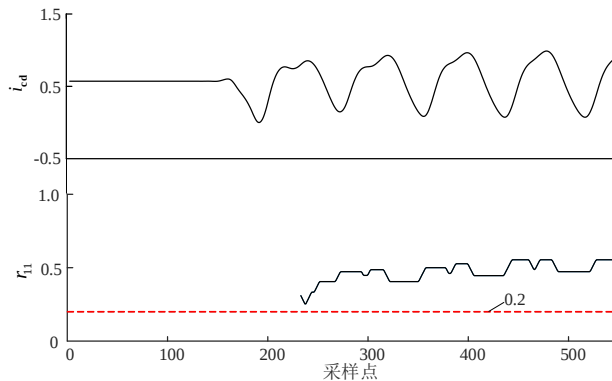


图 C3 B 相空载合闸时的差流及 r_{11} 波形

Fig.C3 Waveform of differential current and r_{11} under phase-B no-load closing condition

3) 试验算例 3: 空载合闸 (对称性涌流)。试验结果如图 C4 所示。

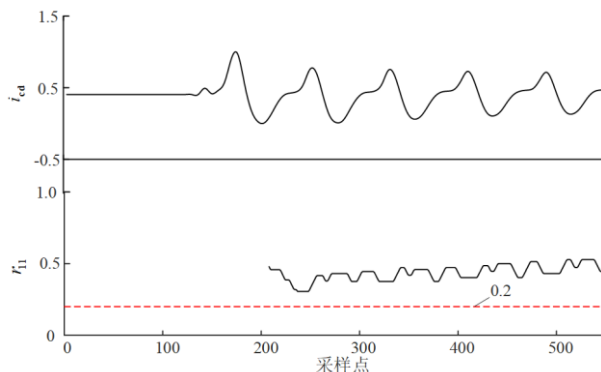


图 C4 B 相对称性涌流下的差流及 r_{11} 波形

Fig.C4 Waveform of differential current and r_{11} when phase-B presents a symmetrical inrush current

试验算例 2、3 分别在第 153、第 128 个采样点时空载合闸, 分别产生单向励磁涌流和对称性涌流, 采用本文所提的判据对两个算例下 B 相差流进行判别, 可以看到, r_{11} 均稳定地高于 0.2 的门槛值, 保护均能被可靠闭锁。

4) 试验算例 4: 带故障合闸, 变压器在第 153 个采样点处带 Y_0 侧 B 相接地故障合闸。试验结果如图 C5 所示。

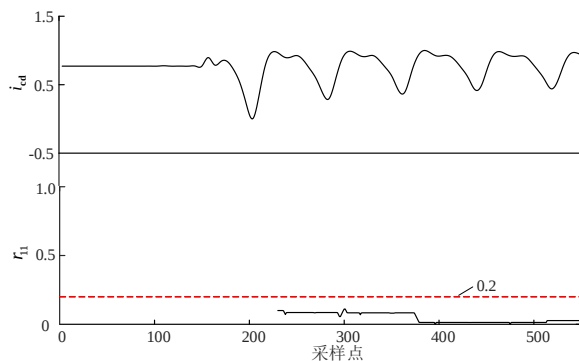


图 C5 B 相带故障合闸时的差流及 r_{11} 波形

Fig.C5 Waveform of differential current and r_{11} when phase-B is closed with a fault

从图 C5 可以看出, 由于在第 153 个采样点处变压器带故障空载合闸, B 相差流波形中既含有故障电流的特性, 又包含涌流的特性, 在故障合闸后 1 个周期内 r_{11} 就小于设定的门槛值 0.2。因此使用本文所提判据, 保护能够快速动作切除故障, 验证了该判据在此种工况下的有效性。