

# 采用S变换相位差及能量相对熵的换流变零序差动保护新判据

翁汉琍<sup>1</sup>, 李昊威<sup>1</sup>, 邢家维<sup>2</sup>, 林湘宁<sup>2</sup>, 黄景光<sup>1</sup>, 李振兴<sup>1</sup>, 刘雷<sup>1</sup>, 王胜<sup>1</sup>

(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. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**针对换流变压器零序差动保护误动现象,提出一种采用S变换相位差及能量相对熵算法的换流变零序差动保护新判据。通过分析换流变压器区内各类故障、区外故障及外部故障切除时零序电流的特点,利用零序差动保护两侧自产零序电流和中性线上零序电流的相位和能量概率分布差异进行识别。当发生区外故障时,零序差动保护两侧零序电流的波形极为相似,其相位差和能量相对熵值都基本为0。当发生区内故障时,零序差动保护两侧零序电流相位相反且波形相似度小,其相位差接近180°且能量相对熵值增大。仿真验证表明,该判据可准确迅速识别区内与区外故障,其性能不受故障类型和过渡电阻的影响,且具有一定的抗电流互感器饱和的能力。

**关键词:**换流变压器;继电保护;零序差动保护;S变换;相位差;能量相对熵

**中图分类号:**TM 77

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201909048

## 0 引言

随着输电技术的不断发展,特高压直流输电工程由于其输送距离长、电压等级高、输送容量大等优点,在我国得到了广泛的应用。

换流变压器(换流变)作为直流输电工程的核心设备之一,除了配置纵联差动保护作为主保护外,还装设了零序差动保护(零差保护),用来保护其中性点接地的Y侧绕组。该保护以换流变Y侧三相进线自产零序电流和中性点零序电流的差值作为动作电流以检测换流变内部接地故障。而零差保护作为灵敏度较高的保护,在非故障扰动的情况下要求能可靠闭锁。

然而,大型电力变压器零差保护误动现象常发生于外部故障存续期间<sup>[1]</sup>与外部故障切除后<sup>[2]</sup>。对于传统交流系统变压器零差保护中已经暴露的误动问题,考虑到特高压换流站交直流场线路复杂、系统强度高,电磁环境更加复杂,可推断特高压换流变零差保护面临着同样甚至更高的误动风险。2014年4月,贵广直流工程调试过程中,肇庆换流站对换流变

充电时零差保护误动导致充电试验失败<sup>[3]</sup>。

目前,大多数对变压器零差保护动作性能的研究主要是针对交流系统传统变压器开展的<sup>[4-6]</sup>,而鲜有针对换流变零差保护动作特性的研究。文献[7]分析得出在换流变外部故障切除后恢复性涌流引起电流互感器(TA)暂态饱和的情况下换流变零差保护存在误动风险,成为换流站乃至整个直流输电工程安全运行的隐患。文献[8]提出利用Hausdorff距离算法作为换流变零差保护判据,虽具有较好的抗恢复性涌流的能力,但在外部故障存续期间和内部故障情况下无法应对TA饱和带来的误判问题。因此,需要找出一种合适的方法提升换流变零差保护的可靠性。

S变换是一种新兴的用于信号处理的时频可逆的分析方法,其不仅具有短时傅里叶变换STFT(Short-Time Fourier Transform)和小波变换的优点,且其时频可逆特性可以使得变换矩阵的分析结果更为直观,计算量小。S变换的出现在电力工程领域的信号分析中取得了良好的效果<sup>[9-10]</sup>。相对熵<sup>[11]</sup>作为信息熵的一种,其对信号的间细微差别具有超强识别的能力,能够清晰地反映两信号之间的差异。在输电线路中,故障前后的电流、电压信号的差异显著,因此相对熵得到了良好的应用<sup>[12-13]</sup>。通过分析发现,换流变在各类故障及扰动下,故障后的零差保护类似线路纵联差动保护,两侧的零序电流幅值和相位呈现差异性,其相对熵也会发生明显变化。

基于此,本文将S变换与信息熵结合,采用S变换相位差和能量相对熵来表征故障后换流变零差保护用自产零序电流和中性线零序电流的极性和能量概率分布差异,并利用故障后两电流间的相位差和

收稿日期:2019-03-23;修回日期:2019-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607106);湖北省梯级水电站运行与控制重点实验室(三峡大学)开放基金资助项目(2018KJX05);三峡大学学位论文培优基金资助项目(2019SSPY057)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607106), the Open Foundation of Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station(China Three Gorges University)(2018KJX05) and the Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University(2019SSPY057)

能量相对熵值有效区分区内外故障。

## 1 S变换相位差及能量相对熵

### 1.1 S变换原理

S变换是短时傅里叶变换和小波变换的继承和发展,是一种时频可逆的分析方法<sup>[14]</sup>。与连续小波变换相比,S变换在时频特征提取上更精确,变换结果直观且计算量小,并且能准确地提取原始信号的相位信息;与短时傅里叶变换相比,S变换的窗口宽度及高度不再固定,而是随频率的变化而变化。

对于一维信号 $x(t)$ ,其连续的S变换<sup>[15]</sup>结果如式(1)所示。

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \omega(\tau - t, f) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} \quad (2)$$

其中, $\omega(\tau - t, f)$ 为高斯窗函数; $\tau$ 为控制高斯窗口在时间轴位置的参数; $f$ 为频率; $i$ 为虚数单位。

由式(2)可知,高斯窗的高度和宽度随着频率的变化而变化。所以,S变换具有良好的时频特性,能精确地提取出相位信息,并且其时频窗可以根据信号调节自身的大小。式(1)经传统傅里叶变换及傅里叶反变换后如式(3)所示。

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\lambda + f) e^{-\frac{2\pi^2\lambda^2}{f^2}} e^{i2\pi\lambda\tau} d\lambda \quad (3)$$

其中, $f \neq 0$ ;  $X(f)$  函数为  $x(t)$  的傅里叶变换; $\lambda$  为平移频率。

因此S变换可以通过快速傅里叶变换FFT(Fast Fourier Transformation)实现快速计算。将式(3)化为S变换的离散形式,设 $\mathbf{x}[\delta T]$  ( $\delta=0, 1, \dots, N-1$ )为信号 $x(t)$ 的离散时间序列, $N$ 为采样点数,采样间隔为 $T$ 。令 $f \rightarrow n/(NT)$ ,  $\tau \rightarrow jT$ ,则 $\mathbf{x}[\delta T]$ 的离散S变换可表示为:

$$\begin{cases} S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{\delta=0}^{N-1} X\left[\frac{\delta+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2\delta^2}{n^2}} e^{\frac{i2\pi\delta j}{N}} & n \neq 0 \\ S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(jT) & n = 0 \end{cases} \quad (4)$$

信号的采样序列经S变换后结果是一个二维复时频矩阵,矩阵的行代表离散频率,其行向量为某一频率下幅值与时间的关系,表征信号的时域特征;矩阵的列代表采样时间,其列向量为某一时刻下的幅频特性,表征信号的频域特征。其中,第 $n$ 行的频率 $f_n = nf_\mu/N$ ,  $f_\mu$ 为信号的采样频率。

### 1.2 S变换相位差

对某电流信号进行采样,对采样信号进行S变换后得到S变换复时频矩阵如式(5)所示。

$$S = \begin{bmatrix} f_1 \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{\frac{N}{2}1} & S_{\frac{N}{2}2} & \cdots & S_{\frac{N}{2}N} \end{bmatrix} \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{\frac{N}{2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,行对应采样时刻 $t$ (点数),即 $t=1, 2, \dots, N$ ;列对应离散频率,即 $f_1, f_2, \dots, f_{\frac{N}{2}}$ 。列向量为某一时刻随频率变化的分布,行向量为某一频率随时间变化的分布,而某一行和列交叉处元素 $S_{\frac{N}{2}N}$ 是一个复数,对应相应频率和时间处信号的幅值和相位。

显然,只考虑提取特定频率下的相位信息没有足够的可靠性,易受干扰信号的影响。因此,可将信号在每一采样点所有频率下的值作求和处理,可以得到该信号在 $t$ 时刻下的S变换元素和 $S_i$ 为:

$$S_i = \sum_{f=1}^{\frac{N}{2}} S[f, t] \quad (6)$$

对式(6)中的元素求相角可得到信号在 $t$ 时刻的S变换相角 $\beta_i$ 为:

$$\beta_i = \text{angle}(S_i) \quad (7)$$

设两信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的相位分别为 $\beta_{xt}$ 、 $\beta_{yt}$ ,然后求取二者的相位差。为了减少干扰,对相位差求均值<sup>[9]</sup>,则两信号在 $t$ 时刻内的S变换相位差的绝对值为:

$$\beta_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |\beta_{xt} - \beta_{yt}| \quad (8)$$

### 1.3 S变换能量相对熵

根据相对熵<sup>[15-16]</sup>的概念可得电流信号 $x(t)$ 相对于信号 $y(t)$ 的S变换能量相对熵 $Q_{xy}$ 的变换过程见附录A,电流信号 $y(t)$ 相对电流信号 $x(t)$ 的S变换能量相对熵 $Q_{yx}$ 有类似定义。考虑对称性, $x(t)$ 和 $y(t)$ 的S变换能量相对熵为:

$$Q = Q_{xy} + Q_{yx} \quad (9)$$

由此可以看出,能量相对熵表征两信号之间能量概率分布的差异,差异越大,相对熵值越大;反之差异越小,相对熵值越接近于0。

## 2 采用S变换相位差及能量相对熵的换流变零差保护新判据

### 2.1 特征分析

由1.3节分析可知能量相对熵对信号间细微差别具有超强识别的能力,具有放大差异的显著作用,其差异具体表现在两信号在频谱上的能量概率分布之间的差异,即能量相对熵值越大,差异越大,反之越小。

基于特高压直流输电模型,对换流变零差保护两侧的三相进线自产零序电流 $i_{\text{self0}}$ 和中性线上零序

电流  $i_{n0}$  分别进行S变换得到其时频矩阵后,根据式(5)~(7)计算出S变换相位差  $\beta(i_{\text{self0}}, i_{n0})$ ,根据附录A中的式(A1)~(A5)以及式(9)构建两电流的能量概率分布空间并计算出S变换能量相对熵  $Q(i_{\text{self0}}, i_{n0})$ 。为便于叙述,下文将  $\beta(i_{\text{self0}}, i_{n0})$ 、 $Q(i_{\text{self0}}, i_{n0})$  分别简称为  $\beta$ 、 $Q$ 。

图1中的(a)~(d)分别为换流变正常内部A相接地故障(工况a)、外部A相接地故障(工况b)、内部A相接地故障中性线TA饱和(工况c)、外部故障切除后恢复性涌流引起中性线TA饱和(工况d)时的  $i_{\text{self0}}$  和  $i_{n0}$  (均为标幺值,后同)。各类工况下波形趋于稳定后的相位差最大值  $\beta_{\text{max}}$  和能量相对熵最大值  $Q_{\text{max}}$  如表1所示。

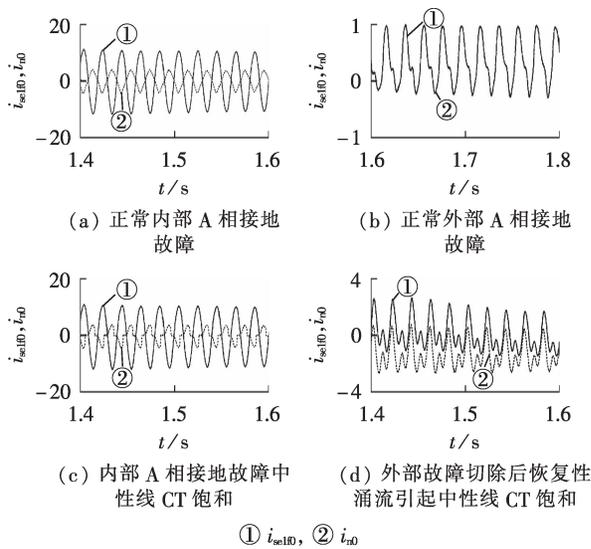


图1 各类工况下  $i_{\text{self0}}$  和  $i_{n0}$  波形

Fig.1 Waveforms of  $i_{\text{self0}}$  and  $i_{n0}$  under various fault conditions

表1 各类工况下的  $\beta_{\text{max}}$  和  $Q_{\text{max}}$

Table 1  $\beta_{\text{max}}$  and  $Q_{\text{max}}$  under various fault conditions

工况	$\beta_{\text{max}} / (^\circ)$	$Q_{\text{max}}$	工况	$\beta_{\text{max}} / (^\circ)$	$Q_{\text{max}}$
a	180.8	0.32	c	179.6	3.23
b	0	0	d	58	1.8

由图1(a)可见,正常内部故障场景下,波形趋于稳定后,两电流波形分布均匀且相位相反,  $\beta_{\text{max}} = 180.8^\circ$  但  $Q_{\text{max}}$  较小。由图1(b)可见,发生正常外部故障时,两零序电流波形基本完全重合,此时  $\beta_{\text{max}} = 0^\circ$ ,两波形能量概率分布相似度高即  $Q_{\text{max}} = 0$ 。由图1(c)可见,内部故障TA饱和场景下,中性线TA发生饱和后,两波形的相位相反同时能量概率分布相似度更低,  $Q_{\text{max}}$  会更大。图1(d)截取了恢复性涌流较为严重情况<sup>[17]</sup>,即外部发生三相接地故障切除后,换流变三相磁链严重不对称,中性线上TA受恢复性涌流影响,其偏磁不断积累,导致TA饱和,由图可见,饱和后的零序电流发生偏置,相位出现少许偏差且

虚假差流增大,此时  $\beta_{\text{max}} = 58^\circ$ ,  $Q_{\text{max}} = 1.8$ 。

若只考虑相位差作为保护判据,发生内部故障1/4周期内的电流波形突变,由于波形不稳定,故障瞬间相位差可能会低于动作门槛值,保护可能会延时动作;内部故障中性线TA饱和后,两电流的相位差值波动增大,饱和的严重程度可能会导致故障瞬间相位差低于动作门槛值,而能量相对熵作为判据在这种情况下能够迅速越过门槛值,保护可靠动作。若只考虑能量相对熵作为保护判据,如果内部故障发生初期没有那么大的突变量,而是在一个很好的时间点发生故障,波形稳定且均匀,能量相对熵值小于门槛值,保护也会出现误闭锁现象,而在故障瞬间相位差稳定高于动作门槛值,保护能够可靠动作。此外,针对外部故障及外部故障切除中性线TA饱和场景,两零序电流相位和能量概率分布差异较小,相位差和熵值均较小。因此,采用本文所提双重判据能够有效识别换流变区内外故障且识别时间仅需1/4的周期,满足保护速动性要求。后文将具体结合仿真分析其必要性。

## 2.2 保护整定

基于上述分析,外部故障TA饱和时的相位差为  $58^\circ$ ,熵值为1.8,则外部故障时的临界相位差  $\beta_d = 58^\circ$ ,临界能量相对熵值  $Q_c = 1.8$ 。零差保护用动作门槛值整定如下:

$$\beta_{\text{set}} = K_{\text{rel}} \beta_d \quad (10)$$

$$Q_{\text{set}} = K_{\text{rel}} Q_c \quad (11)$$

其中,可靠系数  $K_{\text{rel}} = 1.25$ ,则判据的门槛值  $\beta_{\text{set}} = 58 \times 1.25 = 72.5^\circ$ 、 $Q_{\text{set}} = 1.25 \times 1.8 = 2.25$ ,考虑到工程实际需要计及各情况下TA变特性不一致,可适当提高  $\beta_{\text{set}}$  和  $Q_{\text{set}}$  以提升判据的可靠性。 $\beta_{\text{set}}$ 、 $Q_{\text{set}}$  分别向上取整,动作门槛  $\beta_{\text{set}} = 73^\circ$ 、 $Q_{\text{set}} = 2.3$ 。最终换流变零序差动保护判据如式(12)所示。

$$\begin{cases} I_{\text{op}} > I_{\text{op},0} \\ \beta > \beta_{\text{set}} = 73^\circ \\ Q > Q_{\text{set}} = 2.3 \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $I_{\text{op}} = |3I_{\text{self0}} - 3I_{n0}|$ ,  $I_{\text{self0}}$ 、 $I_{n0}$  分别为三相进线自产零序电流  $i_{\text{self0}}$  和中性线上零序电流  $i_{n0}$  的相量形式;  $I_{\text{op},0}$  为换流变零差保护启动电流,其大小为换流变接地绕组的额定电流的30%,即  $I_{\text{op},0} = 0.3 \text{ p.u.}$ 。

因此,基于特高压直流输电模型,当满足判据式(12)中的第1项,即差流大于保护启动值时,保护启动,若  $\beta$  和  $Q$  中任意一项大于动作门槛值,则判为区内故障,保护灵敏动作;反之,  $\beta$  和  $Q$  同时小于动作门槛值时,判为区外故障,保护可靠闭锁。

## 3 仿真实验

本节以  $\pm 800 \text{ kV}$  特高压直流输电模型<sup>[18]</sup>中的整

流侧换流变 $T_1$ 为研究对象,示意图如附录B中的图B1所示。换流变连接于换流器和交流母线之间,采用三绕组变压器,其参数为:额定容量为891 MW,额定变比为 $525\sqrt{3}$  kV/169.5 kV/169.5 kV,联接方式为Y/ $\Delta$ /Y,正序漏抗为0.0075 p.u./0.0075 p.u./0,空心电抗为0.2 p.u.,饱和点为1.25 p.u.,励磁电流为0.1%。零差保护测量到的是换流变Y侧的 $i_{sc1f0}$ 和 $i_{n0}$ 。

采用仿真软件PSCAD/EMTDC并通过8组典型算例验证本文零差保护新判据在各种不同故障场景下的有效性。为便于分析<sup>[8]</sup>,中性线TA采用PSCAD中饱和特性良好的Lucus模型。仿真总时长设为2 s,电流采样率设为10 kHz,本节选取5 ms作为识别判据的窗长,保证判据在速动性和可靠性上均能取得不错的效果。通过时间窗的推移得到相位差和熵值序列,并设置合适的阈值即可对故障进行可靠识别,相位差和熵值阈值分别设为 $73^\circ$ 和2.3。

算例1:换流变正常区外故障场景, $t=1$  s时发生区外A相接地故障,故障持续1 s,零差保护检测到 $i_{sc1f0}$ 和 $i_{n0}$ 的波形见附录B中的图B2。

由图B2可以看出,由于特高压换流站交直流场深度耦合,系统强度高,电磁环境复杂,零序电流受此特殊环境的影响,在故障初期波形中含有大量谐波和直流分量,因此波形并不规整,持续大约0.4 s后开始进入故障后稳态情况。而在整个故障过程中两电流波形仍一致,其幅值和相位基本没有差异。附录B中的图B3为正常区外故障工况下的零序差流,其幅值大小基本为0,远低于保护启动值,保护可靠闭锁。

外部故障持续期间,较大的零序电流可能导致中性线TA饱和,TA传变特性的劣化会产生较大的零序差流,进而引发传统零差保护误动。下面对此类工况进行验证。

算例2:换流变区外故障期间TA饱和场景, $t=1$  s时发生区外A相接地故障伴随中性线TA饱和,故障持续1 s,零差保护检测到 $i_{sc1f0}$ 和 $i_{n0}$ 的波形如图2所示。

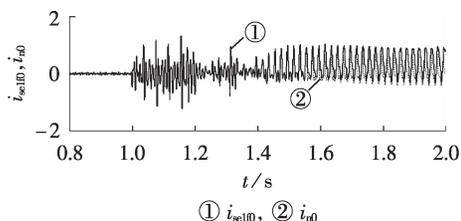


图2 区外故障中性线TA饱和工况下的 $i_{sc1f0}$ 和 $i_{n0}$ 波形  
Fig.2 Waveforms of  $i_{sc1f0}$  and  $i_{n0}$  under external fault condition accompanied with neutral TA saturation

如图2所示, $i_{n0}$ 经TA传变后发生饱和。区外故障中性线TA饱和工况下的零序差流波形见附录B

中的图B4,其峰值大小接近1 p.u.,大于保护启动电流0.3 p.u.,传统换流变零差保护将误动。采用本文所提判据,将 $i_{sc1f0}$ 和 $i_{n0}$ 经S变换处理后, $\beta$ 和 $Q$ 的计算结果如图3所示,其最大值分别为 $56.8^\circ$ 和1.76,均小于动作阈值,保护可靠闭锁。

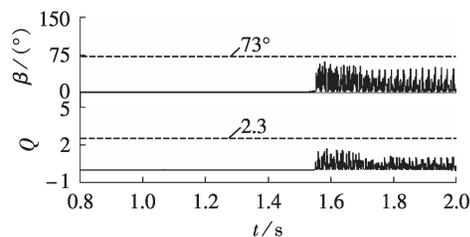


图3 区外故障中性线CT饱和工况下 $\beta$ 和 $Q$ 的计算结果  
Fig.3 Calculative results of  $\beta$  and  $Q$  under external fault condition accompanied with neutral CT saturation

除上述外部故障存续期间TA饱和造成零差保护误动的情况外,根据文献[7]的分析,中性线TA虽在外部故障阶段未达到饱和,但其在外部故障存续期间积累了一定的剩磁,外部故障切除后,TA受到恢复性涌流的影响,剩磁的累积效应会导致TA的渐进性深度饱和,进而在外部故障切除后传统零差保护存在虚假差流,引发误动。因此,下面就该工况下零差保护新判据可靠性进行验证。

算例3:换流变区外故障切除后恢复性涌流伴随中性线TA饱和场景, $t=1$  s时发生区外三相接地故障,于 $t=1.05$  s时切除故障,零差保护检测到的 $i_{sc1f0}$ 和 $i_{n0}$ 波形如图4所示。

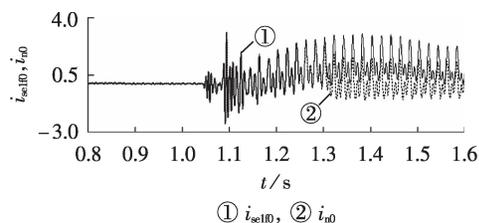


图4 外部故障切除工况下 $i_{sc1f0}$ 和 $i_{n0}$ 波形  
Fig.4 Waveforms of  $i_{sc1f0}$  and  $i_{n0}$  under external fault removal condition

图5为外部故障切除恢复工况下的零序差流波形,可以看出故障切除后,因中性线零序TA饱和,将在零差保护中产生虚假零序差流,其幅值逐渐增大,在1.45 s达到2.2 p.u.,高于保护启动值。若不加闭锁判据,零差保护将会误动。将 $i_{sc1f0}$ 和 $i_{n0}$ 经S变换处理后,两电流间的 $\beta$ 和 $Q$ 的计算结果如图6所示,其最大值分别为 $58^\circ$ 和1.80,均小于动作阈值,保护可靠闭锁。因此该判据能有效识别换流变外部故障切除工况下的零序差流,能可靠制动零差保护。

需要指出的是,现场换流变零差保护装置常采用正序电流制动的闭锁判据来避免由于TA暂态特

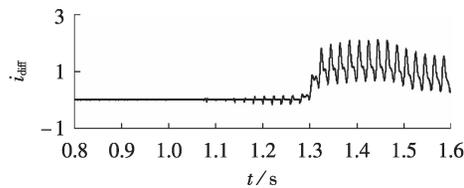
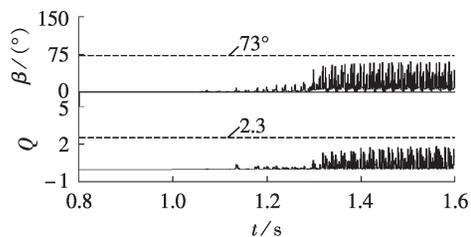


图5 外部故障切除工况下的零序差流波形

Fig.5 Waveform of zero-sequence differential current under external fault removal condition

图6 外部故障切除工况下 $\beta$ 和 $Q$ 的计算结果Fig.6 Calculative results of  $\beta$  and  $Q$  under external fault removal condition

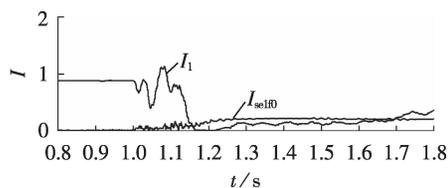
性差异和TA饱和造成的区外短路故障时的虚假的差动零序电流对零差保护的影响。

正序电流制动的原理为若零差保护Y侧的 $i_{se1f0}$ 的幅值小于其正序电流幅值的 $\rho_0$ 倍,则认为零序电流是由TA暂态特性差异及饱和造成的,保护闭锁。其表达式如下:

$$I_{se1f0} < \rho_0 I_1 \quad (13)$$

其中, $I_{se1f0}$ 为 $i_{se1f0}$ 的幅值; $I_1$ 为Y侧的三相进线正序电流幅值; $\rho_0$ 为某一比例常数,一般取为1.0。

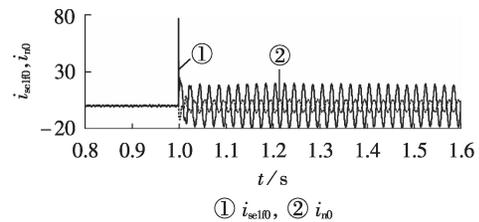
外部故障切除工况下, $I_{se1f0}$ 和 $I_1$ 如图7所示。图中,电流均为标么值。

图7 外部故障切除工况下的 $I_{se1f0}$ 和 $I_1$ Fig.7 Values of  $I_{se1f0}$  and  $I_1$  under external fault removal condition

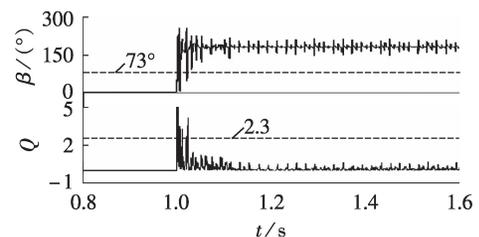
由图7可见,外部故障切除后, $I_{se1f0}$ 在1.15~1.70s内上升至 $I_1$ 以上,不满足正序电流制动判据条件,保护无法被可靠闭锁。因此,即使引入正序电流制动判据,也不能杜绝上述误动的发生。而采用本文所提判据进行判别,则可以可靠制动零差保护,避免误动发生。

算例4:换流变正常区内A相接地故障场景, $t=1$ s时发生区内A相接地故障,故障持续时间为0.6s。零差保护检测到的 $i_{se1f0}$ 和 $i_{n0}$ 波形如图8所示。

由图8可见, $i_{se1f0}$ 和 $i_{n0}$ 的相位相反,两者的幅值差显著增大,远高于保护启动值。两电流经过S变

图8 A相接地故障工况下 $i_{se1f0}$ 和 $i_{n0}$ 波形Fig.8 Waveforms of  $i_{se1f0}$  and  $i_{n0}$  under phase-A grounding fault condition

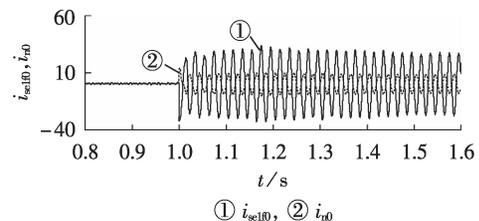
换处理后进行 $\beta$ 和 $Q$ 的计算,结果如图9所示,故障发生瞬间,零序电流发生突变,故障后1/4周期内 $\beta_{max}=49.5^\circ < \beta_{set}$ ,而故障后1/4周期内的 $Q_{max} > 5 > Q_{set}$ ,保护可靠动作。由图9中 $\beta$ 的波形可知,若只考虑相位差作为判据,保护虽能在1个周期内识别故障,但其速动性将降低。

图9 A相接地故障工况下 $\beta$ 和 $Q$ 的计算结果Fig.9 Calculative results of  $\beta$  and  $Q$  under phase-A grounding fault condition

算例5:换流变区内A相接地故障TA饱和场景, $t=1$ s时发生区内A相接地故障伴随换流变中性线TA饱和,故障持续0.6s。零差保护检测到的 $i_{se1f0}$ 和 $i_{n0}$ 的波形见附录B中的图B5。

如图B5所示, $i_{n0}$ 经TA传变后发生饱和。对两电流经过S变换处理后计算 $\beta$ 和 $Q$ ,结果见附录B中的图B6,故障后1/4周期内的 $\beta_{max}=63.8^\circ < \beta_{set}$ ,而故障后1/4周期内的 $Q_{max}=5.78 > Q_{set}$ ,保护灵敏动作。

算例6:换流变正常区内BC相接地故障场景, $t=1$ s时发生区内BC相接地故障,故障持续0.6s。零差保护检测到 $i_{se1f0}$ 和 $i_{n0}$ 的波形如图10所示。

图10 BC相接地故障工况下 $i_{se1f0}$ 和 $i_{n0}$ 波形Fig.10 Waveforms of  $i_{se1f0}$  and  $i_{n0}$  under phase-BC grounding fault condition

对比图8、10易知,故障类型的改变会影响零序电流的幅值, $\beta$ 和 $Q$ 的计算结果如图11所示。由图可见,故障后1/4周期内 $\beta_{max}=187.5^\circ > \beta_{set}$ ,而故障后

1/4周期内的波形稳定且均匀,  $Q_{\max}=1.8 < Q_{\text{set}}$ ,从计算结果可知保护能够灵敏动作。由图11中  $Q$  的波形可知,如果只考虑能量相对熵作为判据,保护会出现误闭锁。

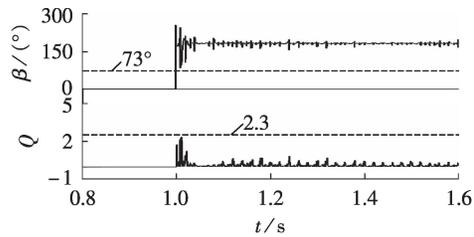


图11 BC相接地故障工况下 $\beta$ 和 $Q$ 的计算结果

Fig.11 Calculative results of  $\beta$  and  $Q$  under BC-phase grounding fault condition

算例7:换流变区内BC相接地故障TA饱和场景,  $t=1\text{ s}$ 时发生区内BC相接地故障且伴随换流变中性线上TA饱和,故障持续0.6 s。零差保护检测到的  $i_{\text{self}0}$  和  $i_{\text{n}0}$  的波形见附录B中的图B7。

从图B7中可以看出,饱和后的  $i_{\text{n}0}$  发生畸变。对  $i_{\text{self}0}$  和  $i_{\text{n}0}$  进行S变换后计算  $\beta$  和  $Q$ , 结果见附录B中的图B8。由图B8可见,受中性线TA饱和因素影响,故障后1/4周期内的  $\beta_{\max}=52.4^\circ < \beta_{\text{set}}$ , 而故障后1/4周期内的  $Q_{\max}=3.92 > Q_{\text{set}}$ , 保护灵敏动作。

算例8:换流变区内不平衡接地故障不同过渡电阻场景,对区内各类接地故障过渡电阻(0~180  $\Omega$ ) 工况下本文所提换流变零差保护判据的灵敏性进行验证,具体仿真计算结果见附录C中的表C1。

由表C1可知,在区内各类接地故障过渡电阻(0~180  $\Omega$ ) 工况下,  $\beta$  和  $Q$  的计算结果均满足本文所提判据,即可在1/4个周期内判为区内故障,保护可靠动作。

## 4 结论

本文通过比较零差保护两侧的零序电流的相位和能量概率分布,结合S变换算法能精确提取信号特征的特点,提出了S变换相位差及能量相对熵算法的换流变零差保护新判据。基于高压直流输电模型进行了仿真验证,结果表明,所提判据在各类内部故障及过渡电阻工况下都能够灵敏动作,在外部故障一直持续以及外部故障切除的工况下也能可靠闭锁,且在区内区外部故障伴随TA饱和情况下,仍具有可靠识别能力,同时该判据仅需1/4周期即可做出判断,满足速动性要求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

[1] 邓涛. 一起主变零序差动保护误动事故分析[J]. 机电信息, 2014(33):56-57.

DENG Tao. Analysis of a mal-operation accident of zero-sequence differential protection of main transformer[J]. Mechanical and Electrical Information, 2014(33):56-57.

[2] 山永霞. 一起220 kV自耦变零差保护误动原因分析及防范措施[C]//2011年云南电力技术论坛. 昆明:云南电网公司,云南省电机工程学会,2011:62.

[3] 李兴,郭卫民. 西门子7UT612装置零序差动保护原理及CT极性整定分析[J]. 继电器,2006,34(18):62-65,78.

LI Xing, GUO Weimin. Principle of restricted earth fault protection and CTs polarity setting method of SIEMENS 7UT612[J]. Relay, 2006, 34(18):62-65, 78.

[4] 王维俭. 再谈220 kV及以上大型变压器装设零序差动保护的必要性[J]. 电力自动化设备,2003,23(4):1-5.

WANG Weijian. Necessity of zero-sequence differential protection for large-sized transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4):1-5.

[5] 朱声石. 变压器零序差动保护的讨论[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10):5-8.

ZHU Shengshi. Discussion on transformer zero-sequence current differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10):5-8.

[6] 罗小莉,赵安国,郭晓冬. 新型变压器零序差动保护方案设计[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):119-121.

LUO Xiaoli, ZHAO Anguo, GUO Xiaodong. Scheme design of transformer zero-sequence differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7):119-121.

[7] 丁苏阳,林湘宁,翁汉琰,等. 换流变零差保护在故障切除恢复性涌流期间的误动风险分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(增刊):12-20.

DING Suyang, LIN Xiangning, WENG Hanli, et al. Mal-operation risk analysis on zero-sequence differential protection of converter substation during existence of recovery inrush due to fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(Supplement):12-20.

[8] 鲁俊生. 交直流深度耦合下变压器差动类保护动作性能分析及新原理研究[D]. 武汉:华中科技大学,2016.

LU Junsheng. Operation performance analyses and novel principles studies on differential-type protections of power transformer under AC-DC deeply coupling interactions[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2016.

[9] 李钊,邹贵彬,许春华,等. 基于S变换的HVDC输电线路纵联保护方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(5):1228-1235.

LI Zhao, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. S-transform based protection method for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5):1228-1235.

[10] 吴禹,唐求,滕召胜,等. 基于改进S变换的电能质量扰动信号特征提取方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(10):2682-2689.

WU Yu, TANG Qiu, TENG Zhaosheng, et al. Feature extraction method of power quality disturbance signals based on modified S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10):2682-2689.

[11] 束洪春,彭仕欣,孙士云,等. 利用S变换能量相对熵的配电网故障选线方法:ZL200910094432.2[P]. 2009-09-30.

[12] 罗国敏,何正友,林圣. 利用小波相对熵的差异识别输电线路暂态信号的探讨[J]. 电网技术,2008,32(15):47-51.

LUO Guomin, HE Zhengyou, LIN Sheng. Discussion on using discrepancy among wavelet relative entropy values to recognize transient signals in power transmission line[J]. Power

- System Technology, 2008, 32(15):47-51.
- [13] 李小鹏,何正友,武骁. 基于S变换能量相对熵的高压输电线路极性比较式纵联保护[J]. 电网技术, 2014, 38(8):2250-2256.  
LI Xiaopeng, HE Zhengyou, WU Xiao. Polarity comparison pilot protection based on S-transform energy relative entropy for high voltage transmission lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(8):2250-2256.
- [14] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S-transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4):998-1001.
- [15] 何连杰,史常凯,闫卓,等. 基于广义S变换能量相对熵的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8):274-280.  
HE Lianjie, SHI Changkai, YAN Zhuo, et al. A fault section location method for small current neutral grounding system based on energy relative entropy of generalized S-transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8):274-280.
- [16] 李小鹏,何正友,武骁,等. 利用S变换能量相对熵的幅值比较式超高速方向元件[J]. 电力系统自动化, 2014, 28(14):113-117.  
LI Xiao peng, HE Zhengyou, WU Xiao, et al. Ultra high speed directional element based on amplitude comparison using S-transform energy relative entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 28(14):113-117.
- [17] 郑涛,王增平,翁汉琍,等. 超/特高压变压器差动保护关键技术与新原理[M]. 北京:科学出版社, 2017:105-108.
- [18] 翁汉琍,李雪华,鲁俊生,等. 特高压换流变压器对称性涌流的生成及其对大差保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5):153-158.  
WENG Hanli, LI Xuehua, LU Junsheng, et al. Symmetrical inrush current mechanism of ultra-high voltage converter transformer and its impact on converter connection-transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5):153-158.

#### 作者简介:



翁汉琍

翁汉琍(1980—),女,湖北宜昌人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析、继电保护与控制(E-mail: honey\_weng@163.com);

李昊威(1994—),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析、继电保护与控制(E-mail: 835020738@qq.com)。

## Novel criterion adopting S-transform phase angle difference and energy relative entropy for zero-sequence differential protection of converter transformer

WENG Hanli<sup>1</sup>, LI Haowei<sup>1</sup>, XING Jiawei<sup>2</sup>, LIN Xiangning<sup>2</sup>,  
HUANG Jingguang<sup>1</sup>, LI Zhenxing<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>, WANG Sheng<sup>1</sup>

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

2. China State Key Laboratory of Electromagnetic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to deal with the mal-operations of zero-sequence differential protection of converter transformer, a novel criterion adopting S-transform phase angle difference and energy relative entropy for zero-sequence differential protection of converter transformer is proposed. By analyzing the characteristics of the zero-sequence currents under different conditions of converter transformer including various internal faults, external faults and external fault removal, the differences of phase and energy probability distribution between the self-produced zero-sequence currents on both sides of zero-sequence differential protection and those on neutral line are identified. The waveforms of zero-sequence currents on two sides of zero-sequence differential protection are very similar during the external faults, both the phase difference and the energy relative entropy of which are close to zero. However, during internal faults, the zero-sequence currents on two sides of zero-sequence differential protection have opposite phases and low waveform similarity, and the phase difference is approximately 180° and the energy relative entropy is increased. The results of simulation tests indicate that immune to the fault types and transition resistances, the proposed criterion can accurately and rapidly discriminate internal and external faults with the ability of anti-saturation of current transformers.

**Key words:** converter transformers; relay protection; zero-sequence differential protection; S-transform; phase angle difference; energy relative entropy

## 附录 A

根据 S 变换复时频矩阵(5)，对其进行求模运算，然后分别计算变换后对应频率  $f_i$  下电流的总能量为：

$$E_i = |S_{i1}|^2 + |S_{i2}|^2 + \cdots + |S_{iN}|^2 \quad i=1, 2, \cdots, N/2 \quad (\text{A1})$$

可得该信号在整个频域下的总能量为：

$$E = E_1 + E_2 + \cdots + E_{\frac{N}{2}} \quad (\text{A2})$$

则该信号在频率  $f_i$  下的能量与该信号的总能量之比为：

$$p_i = E_i / E \quad i=1, 2, \cdots, N/2 \quad (\text{A3})$$

其中，  $p_1 + p_2 + \cdots + p_{\frac{N}{2}} = 1$ 。

根据能量熵的概念可得信号  $x(t)$  的能量熵为：

$$Q_x = |p_{x1} \log p_{x1}| + |p_{x2} \log p_{x2}| + \cdots + \left| p_{x\frac{N}{2}} \log p_{x\frac{N}{2}} \right| \quad (\text{A4})$$

其中，  $p_{x1}$ 、  $p_{x2}$ 、  $\cdots$ 、  $p_{x\frac{N}{2}}$  分别为信号  $x(t)$  在频率  $f_1$ 、  $f_2$ 、  $\cdots$ 、  $f_{\frac{N}{2}}$  下的能量与该信号的总能量之比。

根据相对熵的概念可得电流信号  $x(t)$  相对于信号  $y(t)$  的 S 变换能量相对熵为：

$$Q_{xy} = \left| p_{x1} \log \left( \frac{p_{x1}}{p_{y1}} \right) \right| + \left| p_{x2} \log \left( \frac{p_{x2}}{p_{y2}} \right) \right| + \cdots + \left| p_{x\frac{N}{2}} \log \left( \frac{p_{x\frac{N}{2}}}{p_{y\frac{N}{2}}} \right) \right| \quad (\text{A5})$$

其中，  $p_{y1}$ 、  $p_{y2}$ 、  $\cdots$ 、  $p_{y\frac{N}{2}}$  分别为信号  $y(t)$  在频率  $f_1$ 、  $f_2$ 、  $\cdots$ 、  $f_{\frac{N}{2}}$  下的能量与该信号的总能量之比。

附录 B

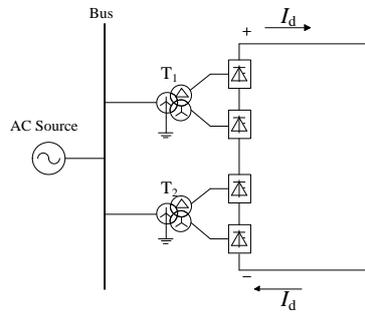


图 B1 特高压双极 12 脉动换流单元示意图

Fig.B1 Schematic diagram of UHV bipolar 12-pulse converter unit

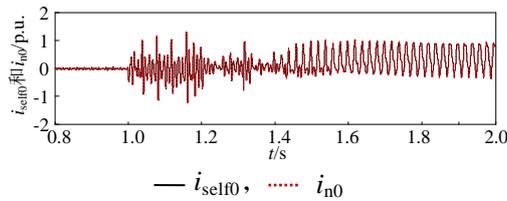


图 B2 正常区外故障工况下的  $i_{self0}$  和  $i_{n0}$  波形

Fig.B2 Waveforms of  $i_{self0}$  and  $i_{n0}$  under normal external fault condition

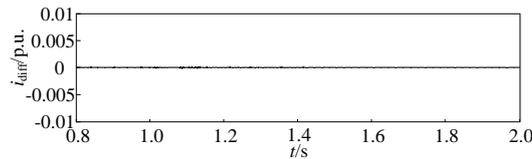


图 B3 正常区外故障工况下的零序差流波形

Fig.B3 Waveform of zero-sequence differential under normal external fault condition

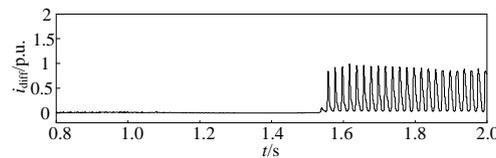


图 B4 区外故障中性线 CT 饱和工况下的零序差流波形

Fig.B4 Waveform of zero-sequence differential current under external fault condition accompanied with neutral CT saturation

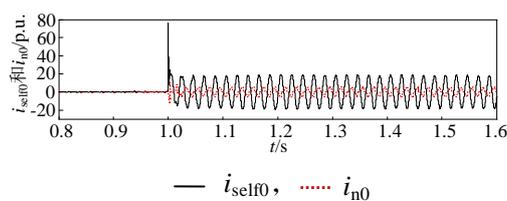


图 B5 A 相接地故障及中性线 CT 饱和工况下  $i_{self0}$  和  $i_{n0}$

Fig.B5 Waveforms of  $i_{self0}$  and  $i_{n0}$  under phase -A grounding fault accompanied with neutral CT saturation

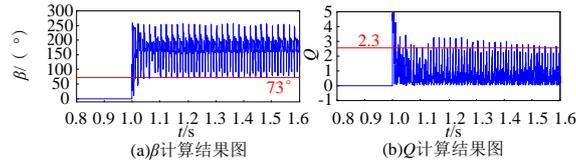


图 B6 A 相接地故障及中性线 CT 饱和工况下  $\beta$  和  $Q$  值

Fig.B6 Values of  $\beta$  and  $Q$  under phase-A grounding fault accompanied with neutral CT saturation

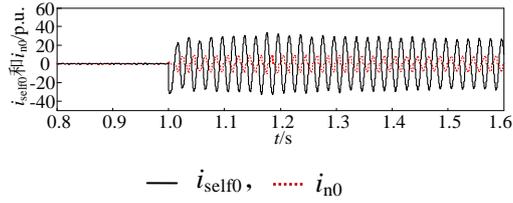


图 B7 BC 相接地故障及中性线 CT 饱和工况下  $i_{self0}$  和  $i_{n0}$

Fig.B7 Waveforms of  $i_{self0}$  and  $i_{n0}$  under phase-BC grounding fault accompanied with neutral CT saturation

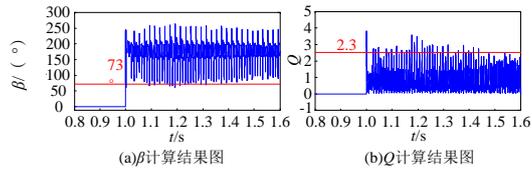


图 B8 BC 相接地故障及中性线 CT 饱和工况下  $\beta$  和  $Q$  值

Fig.B8 Values of  $\beta$  and  $Q$  under phase-BC grounding fault accompanied with neutral CT saturation

附录 C

表 C1 各类区内故障不同过渡电阻仿真计算结果

Table C1 Simulation calculation results of various types of faults with different transition resistances

编号	故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	$\beta/ (^{\circ})$	$Q$	判断结果
1	A-G	30	$\frac{56.3}{\times}$	$\frac{3.33}{\sqrt{}}$	区内
2	A-G	60	$\frac{63.4}{\times}$	$\frac{2.82}{\sqrt{}}$	区内
3	A-G	90	$\frac{66.9}{\times}$	$\frac{2.78}{\sqrt{}}$	区内
4	A-G	120	$\frac{75.8}{\sqrt{}}$	$\frac{2.86}{\sqrt{}}$	区内
5	A-G	150	$\frac{172.6}{\sqrt{}}$	$\frac{1.35}{\times}$	区内
6	A-G	180	$\frac{183.5}{\sqrt{}}$	$\frac{1.42}{\times}$	区内
7	BC-G	30	$\frac{199.3}{\sqrt{}}$	$\frac{1.61}{\times}$	区内
8	BC-G	60	$\frac{182.9}{\sqrt{}}$	$\frac{1.44}{\times}$	区内
9	BC-G	90	$\frac{188.8}{\sqrt{}}$	$\frac{1.37}{\times}$	区内
10	BC-G	120	$\frac{179.2}{\sqrt{}}$	$\frac{1.28}{\times}$	区内
11	BC-G	150	$\frac{192.1}{\sqrt{}}$	$\frac{1.51}{\times}$	区内
12	BC-G	180	$\frac{199.6}{\sqrt{}}$	$\frac{1.62}{\times}$	区内

注： $\times$ 、 $\sqrt{}$ 分别表示未超过整定值和超过整定值。