

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200081

基于三相电流平方和比值的短路故障快速检测方法

李奕璋, 陈红坤, 石晶, 陈磊, 胡卓然, 吴行健

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了快速准确地检测出短路故障, 并使故障限流器快速投入运行, 提出了一种基于三相电流平方和比值的短路故障快速检测方法。该方法利用前后时间窗内三相电流平方和均值之比作为故障检测量, 在三相短路故障时不受故障初相角影响, 不受谐波影响。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 建立了 500 kV 输电线路模型, 合理选取了该方法的整定值与闭锁值。考虑不同故障类型、不同故障初相角、不同过渡电阻、空载合闸、谐波及噪声等因素, 验证了该方法的快速性及有效性。在各类故障工况及干扰工况下, 比较了该方法与常用三种检测方法的性能差异。仿真结果表明, 该方法性能良好, 能够快速可靠地检测出短路故障。

关键词: 故障检测; 短路故障; 短路电流; 三相电流平方和; 故障初相角

A fast short-circuit fault detection method based on the ratio of three-phase currents square sum

LI Yizhang, CHEN Hongkun, SHI Jing, CHEN Lei, HU Zuoran, WU Xingjian

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to detect short-circuit faults quickly and accurately, and put the fault current limiter into operation quickly, a fast short-circuit fault detection method based on the ratio of three-phase currents square sum is proposed. This method detects fault by the ratio of three-phase currents square sum. It is not affected by the initial fault phase angle under a three-phase short-circuit fault and harmonics. A 500 kV transmission line model is established on the PSCAD/EMTDC simulation platform. Reasonable setting values and blocking values of this method are selected. The speed and effectiveness of this method are verified under different fault types, different fault initial phase angles, different transition resistances, no-load closing, harmonics and noise. The performance difference is compared between this method and three commonly-used methods under fault and interference conditions. The simulation results show that this method has good performance and can detect short-circuit faults quickly and reliably.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904300).

Key words: fault detection; short-circuit fault; short-circuit current; three-phase currents square sum; initial fault phase angle

0 引言

短路电流具有热破坏性和力破坏性, 前者影响材料的绝缘性能, 后者影响输电线路及电力设备的结构性能^[1-4]。快速检测出短路故障, 使故障电流限制器及时投入工作而限制短路电流是故障限流器的关键技术问题^[5-10]。

在实际应用中, 短路故障检测方法一般是基于电流瞬时值、斜率或其他特征信号, 即当短路电流瞬时值、斜率或其他特征量大于预设整定值时, 检

测方法判断为短路故障, 与此同时控制器发出动作指令^[11-16]。目前, 国内外学者针对短路故障快速检测方法取得了许多研究成果。文献[17-18]基于华东电网示范工程, 利用电流瞬时值与斜率配合进行短路故障检测, 检测时间在 2~7 ms 之间, 误判率较低, 但快速性不够。文献[19]采用电流曲率作为故障检测判据, 能更快识别故障信号, 但由于曲率中含有一阶、二阶微分, 因此对噪声及异常数据敏感^[20], 需要装设滤波环节, 且易受故障初相角影响。文献[21]利用电网电压及功率动态变化识别短路故障, 该方案通过两种判据配合检测, 其短路故障检测速度快于电流瞬时值检测方法, 但对高频噪声及谐波

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904300)

敏感,需预先用滤波器进行滤波处理。文献[22]利用移相器对故障进行快速识别,若门槛值设置过小,该方法容易误响应,若门槛值设置过大,检测时间可能超过 10 ms,无法同时满足快速性与可靠性。文献[23]基于神经网络识别短路故障,该方法虽然能有效识别故障,但需要提前经过大量数据训练来改善方法性能^[24],由于现场短路数据有限,尚不能在实际工程中应用。

从系统的暂态稳定性和电气设备的动稳定性出发,三相系统中对称短路故障较不对称短路故障有更大的破坏性,因此期望能寻求一种能极快地检测出三相对称故障,对不对称故障也能快速识别的方法。已有方法多为相分检测方法^[15-19],本文选取三相电流平方和作为暂态特征量,在分析短路故障前后三相电流平方和变化特征的基础上,提出一种基于“三相电流平方和比值”的短路故障检测方法,可用于故障电流限制器。根据实际线路参数,在 PSCAD/EMTDC 上搭建了 500 kV 输电线路模型,在故障工况下对此方法快速性进行了测试,在空载线路合闸、谐波及噪声等工况下对此方法的适应性进行了验证。并与电流瞬时值、电流突变量及电流斜率等检测方法进行了比较,比较结果证明了所提方法的优越性。

1 检测方法原理分析

1.1 暂态特征量的选取

短路故障时,故障初相角会影响短路电流的波形特征及幅值。某些故障初相角工况下,短路电流可能先经过相邻电流零点小于 1/2 工频周期的电流小半波,而后上升至最大值。对于电流瞬时值、斜率等检测方法,当小半波峰值小于整定值时,会影响检测的快速性。三相电路中,由于各相间相差 120°,当短路发生时,三个不同相位的电流不可能同时处于小半波时间段,因此本文选取三相电流平方和作为特征量来研究短路故障检测方法,从时域角度上分析三相信号暂态整体特征,从而降低故障初相角对短路故障检测方法性能的影响。

本文定义三相电流平方和(Three-phase Currents Square Sum, CSS)。

$$CSS(t) = i_a(t)^2 + i_b(t)^2 + i_c(t)^2 \quad (1)$$

式中, $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 、 $i_c(t)$ 分别为 a、b、c 各相电流。

短路后三相电流平方和迅速上升,通过辨识三相电流平方和的变化快速检测出短路故障,故利用此来反映短路故障的暂态特征。

如图 1 所示的三相电路,图中: E_m 为电源电势

幅值; α 为 a 相电源初相角,即故障初相角; ω 为角频率; t 为时间; $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 、 $i_c(t)$ 分别为 a、b、c 各相电流。当系统正常运行时,每相的电阻及电感分别为 $R + R'$ 、 $L + L'$ 。

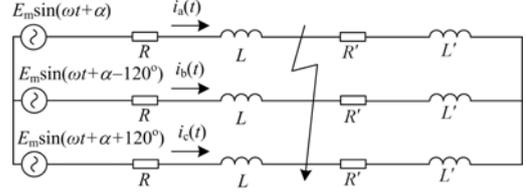


图 1 三相电路

Fig. 1 Three-phase circuit

由于三相电路对称,三相电流表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_a(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \\ i_b(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ - \varphi) \\ i_c(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ - \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} I_m = \frac{E_m}{\sqrt{(R + R')^2 + \omega^2(L + L')^2}} \\ \varphi = \arctg \frac{\omega(L + L')}{R + R'} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_m 为电流幅值; φ 为功率因数角。

计算三相电流平方和 $CSS(t)$ 。

$$CSS(t) = i_a(t)^2 + i_b(t)^2 + i_c(t)^2 = \frac{3}{2} I_m^2 \quad (4)$$

可以看出,当系统正常运行且三相对称时,三相电流平方和 $CSS(t)$ 不随电流周期变化,是同稳态电流幅值相关的常量,与电源相角无关。

当发生三相短路故障时,故障电流表达式为

$$\begin{cases} i_{ka}(t) = I_{a0} e^{-\frac{t}{\tau}} + I'_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi') \\ i_{kb}(t) = I_{b0} e^{-\frac{t}{\tau}} + I'_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi' - 120^\circ) \\ i_{kc}(t) = I_{c0} e^{-\frac{t}{\tau}} + I'_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi' + 120^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} I_{a0} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I'_m \sin(\alpha - \varphi') \\ I_{b0} = I_m \sin(\alpha - \varphi - 120^\circ) - I'_m \sin(\alpha - \varphi' - 120^\circ) \\ I_{c0} = I_m \sin(\alpha - \varphi + 120^\circ) - I'_m \sin(\alpha - \varphi' + 120^\circ) \\ I'_m = E_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \\ \varphi' = \arctg(\omega L / R) \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_{a0} 、 I_{b0} 、 I_{c0} 分别为 a、b、c 相短路电流衰减直流分量初始值; τ 为衰减直流分量的时间常数; I'_m 为短路电流周期分量幅值; φ' 为故障后电路的阻抗角; R 与 L 分别为故障后每相的电阻与电感。

计算可得三相电流平方和如式(7)所示。

$$CSS(t) = i_{ka}(t)^2 + i_{kb}(t)^2 + i_{kc}(t)^2 =$$

$$\left[3I'_m \cos(\omega t + \varphi - \varphi') - 3I'_m e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega t) \right]^2 +$$

$$\left[\frac{3}{2} I_m^2 + \frac{3}{2} I_m'^2 - 3I'_m I_m \cos(\varphi - \varphi') \right] e^{-\frac{2t}{\tau}} + \frac{3}{2} I_m'^2$$
(7)

上式可简化为

$$CSS(t) = I_1 + I_2 e^{-\frac{2t}{\tau}} + I_3 \cos(\omega t + \beta) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} I_1 = \frac{3}{2} I_m'^2 \\ I_2 = \frac{3}{2} I_m^2 + \frac{3}{2} I_m'^2 - 3I'_m I_m \cos(\varphi - \varphi') \\ I_3 = 3I'_m \sqrt{I_m^2 \sin^2(\varphi - \varphi') + (I_m \cos(\varphi - \varphi') - I_m')^2} \\ \beta = \arctan \frac{I'_m - I_m \cos(\varphi - \varphi')}{I_m \sin(\varphi - \varphi')} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_1 为常数项; I_2 为衰减项初始值; I_3 为交变衰减项初始值; β 为交变衰减项的相位角。

从式(8)可知, 三相短路故障时, 三相电流平方和与故障初相角 α 无关。三相电流平方和示意图如图 2 所示, 三相电流平方和由常数项、衰减项、交变衰减项构成, 式(9)中 I_1 对应图中常数项, I_2 对应图中衰减时间常数为 $\tau/2$ 的衰减项初始值, I_3 对应图中衰减时间常数为 τ 的交变衰减项初始值。

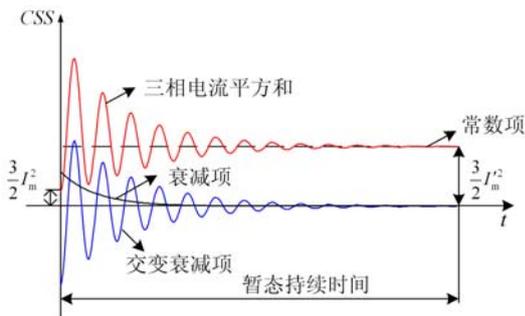


图 2 三相电流平方和示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-phase currents square sum

1.2 检测量的选取

比值是一种衡量变量变化程度的有效指标, 本文尝试利用比值来考察三相信号暂态特征的变化情

况。此外, 一方面为了避免测量误差、噪声及谐波的干扰, 另一方面为了保证检测方法的实时性, 本文在移动时间窗内对历史三相电流平方和数据求均值, 移动时间窗示意图如图 3 所示, 三相电流平方和比值计算流程如式(10)一式(12)所示。先计算时间窗 $[t - T_s, t]$ 内三相电流平方和均值 $A(t)$, 以及时间窗 $[t - T_s - \Delta t, t - \Delta t]$ 内三相电流平方和均值 $A(t - \Delta t)$, 然后对 $A(t)$ 与 $A(t - \Delta t)$ 求比, 该比值即为检测量 $D(t)$ 。

$$A(t) = \frac{1}{T_s} \sum_{t-T_s}^t CSS(t) \quad (10)$$

$$A(t - \Delta t) = \frac{1}{T_s} \sum_{t-T_s-\Delta t}^{t-\Delta t} CSS(t - \Delta t) \quad (11)$$

$$D(t) = \frac{A(t)}{A(t - \Delta t)} \quad (12)$$

式中: T_s 为时间窗长度; Δt 为时间窗 $[t - T_s, t]$ 与时间窗 $[t - T_s - \Delta t, t - \Delta t]$ 的时间间隔。 $A(t)$ 、 $A(t - \Delta t)$ 与 $D(t)$ 均以采样频率更新, 采样频率为千赫兹数量级。

由于稳态电流周期为 T , 长度为 T 的时间窗能反映电流信号的全部特征, 因此在工频周期下 T_s 取值为 20 ms。

式(12)中时间间隔 Δt 反映了两时间窗内数据的重叠与更新特征, 图 4 所示为同一被测信号, 不同 Δt 下检测量 $D(t)$ 随时间变化趋势图。 Δt 越小, 两时间窗内重叠数据越多, $A(t)$ 与 $A(t - \Delta t)$ 越接近, 检测量峰值 D_{\max} 越低, 即辨识度越差, 但检测量峰值出现时刻越早, 即快速性越好。文中 Δt 取 1 ms。

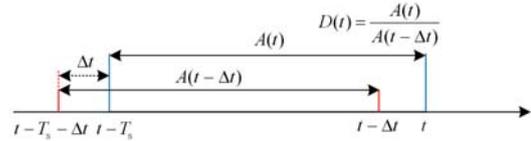


图 3 移动时间窗示意图

Fig. 3 Schematic diagram of moving time window

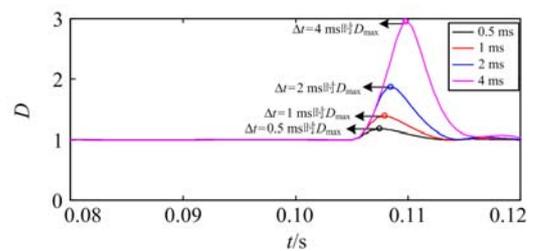


图 4 检测量趋势图

Fig. 4 Tendency diagram of $D(t)$

1.3 短路故障检测判据

系统正常运行且三相对称时, 始终有 $CSS(t) =$

$1.5I_m^2$, 检测量 $D(t)=1$ 。检测量 $D(t)$ 不受系统等效阻抗及电源相角影响。即使不对称运行, 只要负荷稳定, 由于电流具有周期性的特点, 检测量 $D(t)=1$ 也成立。当发生短路故障时, 由于故障相电流增大, 三相电流平方和也对应增大, 此时检测量 $D(t) > 1$, 若设定一个大于 1 的整定值 TH , 当 $D(t) > TH$ 时, 即可判断短路故障发生, 控制器发出故障指令, 使限流器切换到限流状态。

需特别指出的是, 为避免比值方法在线路空载时分母过小出现误响应, 需增加闭锁判据, 即对 $CSS(t)$ 设定一个闭锁值 ε 。闭锁值 ε 取值应该大于或等于投入最大负荷时三相最大冲击电流平方和瞬时值。无论线路是否空载, 检测量 $D(t)$ 均实时计算, 但仅当 $CSS(t)$ 大于闭锁值时, 检测量 $D(t)$ 才用来进行短路故障判断。

为避免随机异常数据的干扰, 连续三个采样点三相电流平方和均大于闭锁值时解锁, 开始比较检测量 $D(t)$ 与整定值 TH 的大小关系, $D(t)$ 大于 TH 时判断为短路故障并向控制器发出故障指令, 使限流器切换至限流状态, 小于或等于 TH 时判断为正常工况, 控制器不发送指令, 限流器工作在正常无损耗状态。故障检测判据为

$$\begin{cases} CSS(t) \leq \varepsilon \rightarrow \text{闭锁} \\ CSS(t) > \varepsilon, D(t) > TH \rightarrow \text{短路故障} \\ CSS(t) > \varepsilon, D(t) \leq TH \rightarrow \text{正常工况} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ε 为闭锁值; TH 为整定值。

由于检测方法需要 21 ms 的历史数据, 因此当采样数据总时长 $t_d \leq 21$ ms 时, 检测方法因数据缺失而无法启动, 此时若发生短路故障, 则无法进行故障判断, 因此需预先给定 21 ms 的三相电流平方和的缺省值 S , 该值为正常运行时三相电流平方和, 文中 $S = 24 \text{ kA}^2$ 。根据以上分析, 基于三相电流平方和比值的短路故障检测流程如图 5 所示。

1.4 谐波影响分析

若在原始三相电流上增加幅值为 I_{nm} 的 n 次谐波, 谐波含量 $m = I_{nm} / I_m$, 则增加谐波后三相电流表达式如式(14)所示。

$$\begin{cases} i'_a(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + I_{nm} \sin(n\omega t + \alpha_n - \varphi_n) \\ i'_b(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 120^\circ) + \\ \quad I_{nm} \sin(n\omega t + \alpha_n - \varphi_n - 120^\circ) \\ i'_c(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi + 120^\circ) + \\ \quad I_{nm} \sin(n\omega t + \alpha_n - \varphi_n + 120^\circ) \end{cases} \quad (14)$$

式中: α_n 为 n 次谐波电压相角; φ_n 为 n 次谐波功率因素角。

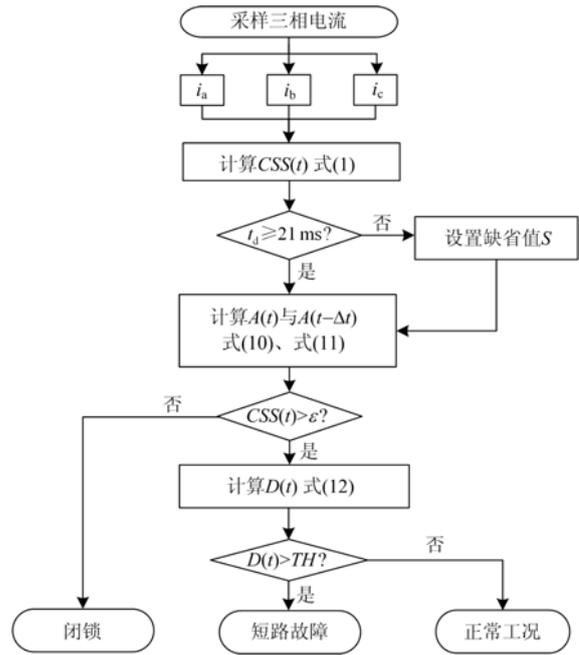


图 5 短路故障检测流程图

Fig. 5 Flow diagram of short-circuit fault detection

计算含谐波的三相电流平方和, 如式(15)所示。

$$\begin{aligned} CSS(t) = i'_a(t)^2 + i'_b(t)^2 + i'_c(t)^2 = \\ 3I_m I_{nm} \cos((n-1)\omega t + \alpha - \varphi - \alpha_n + \varphi_n) + \\ 3I_m^2 + 3I_{nm}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

对于 n 次谐波, $n-1 \geq 1$, 由式(15)可知, 含谐波的三相电流平方和周期为 $T/(n-1)$ 。由于时间窗长度 $T_s = T$, 是含谐波的三相电流平方和周期的整数倍, 由式(10)、式(11)可得, $A(t) = A(t - \Delta t) = 3I_m^2 + 3I_{nm}^2$, 由式(12)可得 $D(t) = 1$, 因此检测量不受谐波影响。

2 整定值计算及仿真测试

2.1 仿真模型

为测试三相电流平方和比值检测方法的适应性及有效性, 本文建立了 500 kV 输电线路的 PSCAD/EMTDC 仿真模型, 如图 6 所示。为了准确模拟短路故障暂态过程, 输电线路采用频率相关模型, 线路全长 66 km, 其中: 线路正序参数为 $r_1 = 0.011$

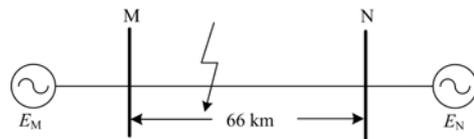


图 6 500 kV 输电线路模型

Fig. 6 500 kV transmission line model

Ω/km , $x_1=0.271 \Omega/\text{km}$, $c_1=0.013 \mu\text{F}/\text{km}$; 零序参数 $r_0=0.179 \Omega/\text{km}$, $x_0=0.664 \Omega/\text{km}$, $c_0=0.008 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

2.2 整定值计算

对于故障限流器来说, 其保护范围应当是动作电流范围, 而不应当是故障距离, 即当线路电流超过一定数值时, 无论是区内还是区外故障, 故障限流器都应当动作。

不同工况下检测方法测试结果如表 1 所示, 可以看出, 负荷投切时线路冲击电流可达到 4.6~7.4 kA。对于故障限流器来说, 负荷投切时线路电流水平较低应当拒动, 线路发生短路故障时电流水平较高, 应当正确动作, 因此故障限流器动作电流门限值取值在 8~30 kA 范围内较为合适。

表 1 不同工况下测试结果

Table 1 Test results under different fault conditions

工况	电流幅值/kA	检测量峰值
正常运行	4	1
末端单相短路	30	1.6~2.1
末端三相短路	38	2.8
200 MW 负荷投切	4.6	1.09
500 MW 负荷投切	5.8	1.18
800 MW 负荷投切	7.4	1.31

不同整定值对应的检测方法、动作范围及平均检测时间如表 2 所示, 可以看出, 整定值越大, 动作电流范围越大, 检测时间越长, 此外, 整定值大于 1.3 时, 才满足故障限流器动作电流取值范围。为保证限流器动作电流取值范围以及检测方法的快速性, 整定值 TH 取值为 1.4, 该整定值下检测方法最小三相短路故障动作电流为 9 kA。通过仿真测试可知, 投入最大负荷时三相最大冲击电流平方和瞬时值为 71.2 MA^2 , 因此闭锁值 ε 取值为 72 MA^2 。

表 2 动作电流范围及检测时间

Table 2 Operating current range and test time

TH	动作电流范围/kA				平均检测时间/ms
	单相短路	两相相间短路	两相接地短路	三相短路	
1.6	≥ 30	≥ 14	≥ 14	≥ 13	2.1
1.5	≥ 25	≥ 12	≥ 12	≥ 11	1.8
1.4	≥ 20	≥ 10	≥ 10	≥ 9	1.5
1.3	≥ 15	≥ 8	≥ 8	≥ 7.3	1.3
1.2	≥ 11	≥ 6.3	≥ 6.3	≥ 6	1.1
1.1	≥ 7	≥ 5	≥ 5	≥ 4.7	0.9

2.3 故障位置测试

为测试不同故障位置下检测方法的有效性, 故障位置分别设置在线路首端、中间、末端, 故障工况设置为单相短路故障、两相相间短路故障、两相接地短路故障以及三相短路故障。

不同故障位置下检测方法检测结果如表 3 所示。可以看出, 线路末端发生单相短路故障时检测量峰值最小, 此时检测量峰值为 2.06, 大于整定值, 检测方法可靠响应。说明该方法在不同故障位置下具有较好的适应性与故障识别能力。

表 3 不同故障的故障点位置测试结果

Table 3 Test results of different fault positions

工况	故障位置	检测量峰值	峰值时间/ms	检测时间/ms
单相短路	线路首端	3.40	3.80	2.10
	线路中间	2.52	4.60	2.40
	线路末端	2.06	5.30	2.60
两相相间短路	线路首端	4.80	2.10	0.70
	线路中间	3.35	2.50	1.00
	线路末端	2.61	3.10	1.30
两相接地短路	线路首端	4.70	2.30	0.90
	线路中间	3.41	2.70	1.10
	线路末端	2.68	3.30	1.50
三相短路	线路首端	5.98	1.70	0.40
	线路中间	3.88	2.00	0.60
	线路末端	2.85	2.20	0.80

2.4 故障初相角测试

为测试各故障初相角下检测方法的有效性, 设置故障点位置在线路末端, 考虑三相对称短路工况, 以及单相短路工况, 设置故障初相角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

如图 7 所示为故障初相角 0° , 0.1 s 线路末端发生三相短路故障时三相电流及检测量的波形。可以看出, 检测时间为 0.8 ms, 能够快速检测出短路故障。此外, 仿真测试了故障初相角分别为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时的三相短路故障, 其检测量与检测时间均相同, 不受故障初相角影响。

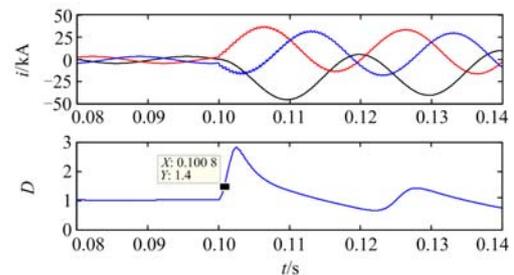


图 7 α 为 0° 时三相短路故障测试结果

Fig. 7 Test results under three-phase short-circuit fault ($\alpha=0^\circ$)

当线路末端发生单相短路故障时, 检测方法检测结果如表 4 所示。可以看出, 故障初相角在 90° 时, 刚好短路故障发生在电流峰值时刻, 此时检测时间最短, 为 1.3 ms。故障初相角在 144° 时, 检测时间最长, 为 4.8 ms。故障初相角为 144° 时三相电流及检测量波形如图 8 所示, 可以看出, 短路故障

后, 在小半波阶段检测量未能达到整定值, 在大半波上升阶段才超出整定值, 检测出短路故障。

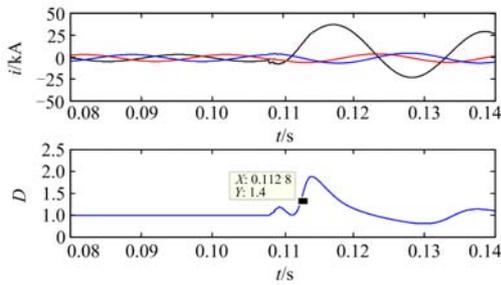


图 8 α 为 144° 时单相短路故障测试结果

Fig. 8 Test results under single-phase short-circuit fault ($\alpha=144^\circ$)

表 4 线路末端单相短路时测试结果

Table 4 Test results under single-phase short-circuit fault at the end of the line

故障初相角/ $^\circ$	检测量峰值	检测量峰值时间/ms	检测时间/ms
0	2.061	4.9	2.6
18	2.037	3.9	2.2
36	2.084	3.4	1.8
54	2.132	2.7	1.7
72	2.134	2.4	1.7
90	2.147	2.2	1.3
108	1.837	2.3	1.5
126	1.643	2.4	1.6
144	1.824	7.5	4.8
162	1.902	6	2.9
180	2.061	4.9	2.6

综合线路末端三相短路工况与线路末端单相短路工况, 可以看出, 在三相短路故障时该方法不受故障初相角影响, 检测时间不超过 0.8 ms, 短路故障识别速度极快。在单相短路故障时该方法受故障初相角影响, 在小半波峰值较小情况下, 检测时间会达到 4.8 ms, 较之三相短路故障识别速度较慢。

2.5 过渡电阻测试

为测试不同过渡电阻下检测方法的有效性, 故障点位置设置在线路末端, 故障工况设置为单相短路故障、两相相间短路故障、两相接地短路故障以及三相短路故障, 过渡电阻设置为 0~100 Ω 。

不同过渡电阻下检测方法检测结果如表 5 所示。可以看出, 过渡电阻越大, 检测量峰值越小, 检测时间越久。过渡电阻为 0~30 Ω 时, 各类故障工况下该方法均能可靠响应, 检测时间总体在 0.8~3.1 ms 之间。过渡电阻为 100 Ω 时, 各类故障工况下短路电流水平较低, 未达到相应的限流器动作电流门槛, 限流器不需要投入。

表 5 不同过渡电阻测试结果

Table 5 Test results under different fault resistance

工况	过渡电阻/ Ω	电流幅值/kA	检测量峰值	检测时间/ms
单相短路	0	30.0	2.06	2.60
	10	20.5	1.82	2.80
	30	13.4	1.41	3.10
	100	7.1	1.11	—
两相相间短路	0	33.7	2.61	1.30
	10	21.6	2.36	1.60
	30	13.8	1.59	1.90
	100	7.2	1.28	—
两相接地短路	0	34.6	2.68	1.50
	10	22.4	2.21	1.60
	30	13.3	1.54	1.70
	100	7.2	1.24	—
三相短路	0	38.2	2.85	0.80
	10	25.9	2.56	1.00
	30	14.1	1.69	1.20
	100	7.2	1.29	—

2.6 线路空载合闸测试

线路空载合闸时检测方法需闭锁, 为验证闭锁判据的有效性, 设置线路空载合闸工况, 合闸时刻设置在 0.1 s。

线路空载合闸测试结果如图 9 所示, 线路空载合闸瞬间最大冲击电流为 7.2 kA, 检测量远大于整定值 1.4, 经计算得到的三相电流平方和最大值为 71.2 kA^2 小于闭锁值 72 kA^2 , 满足闭锁条件, 该方法不会误响应。

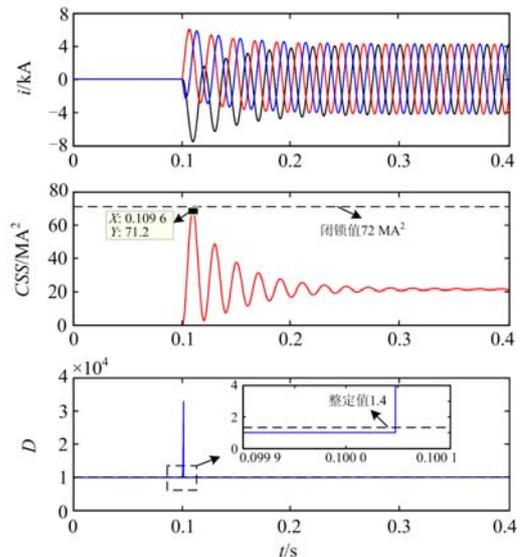


图 9 线路空载合闸测试结果

Fig. 9 Test results during no-load line switching

2.7 谐波干扰测试

为测试在谐波环境下检测方法的适应性, 对幅值为 4 kA 的三相电流信号分别增加 20% 含量的 150 Hz 三次谐波及 10% 含量的 250 Hz 五次谐波进行测试。最终测试结果如图 10 所示。可以看出, 测试结果与理论分析一致, 该方法不受谐波影响。

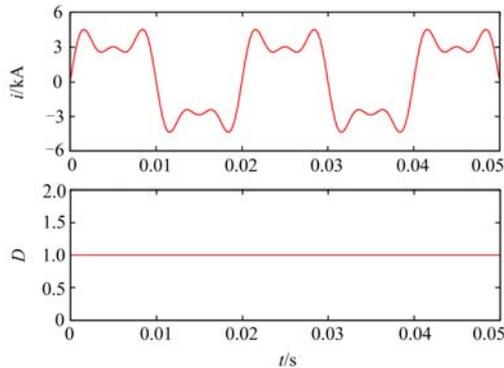


图 10 谐波测试结果

Fig. 10 Test results with harmonics

2.8 噪声干扰测试

为测试在噪声环境下检测方法的适应性, 对幅值为 4 kA 的电流信号增加信噪比为 10 dB 的高斯白噪声, 最终测试结果如图 11 所示。可以看出, 在强噪声环境下, 正常运行时, 检测方法检测测量峰值 $D_{\max}=1.03 < 1.4$, 小于整定值, 该方法不会误响应。原因是检测方法采用了移动时间窗, 取三相电流平方和的平均值, 再求比计算检测量, 减小了噪声对检测量的影响。因此, 该方法对噪声信号敏感性低, 具有良好的适应性。

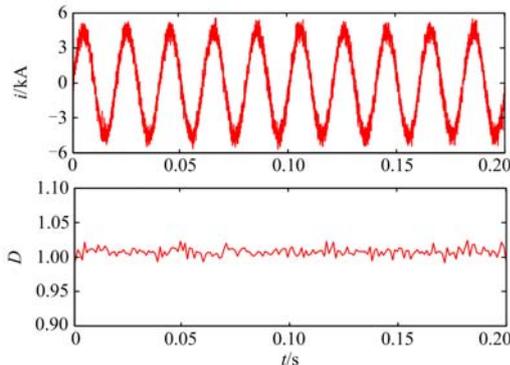


图 11 噪声测试结果

Fig. 11 Test results with noise

3 方法对比

仿真中将基于三相电流平方和比值检测方法方法与基于电流瞬时值、电流突变量、电流斜率的三种检测方法进行比较, 以验证本文所提方法的有效性。

对于电流瞬时值、电流突变量、电流斜率三种检测方法, 在相同动作电流范围内取整定值。则电流瞬时值、电流突变量、电流斜率三种检测方法的整定值分别为 9 kA、5 kA、2.9 kA/ms。在线路首端、中间及末端分别设置单相接地故障、两相相间短路故障、两相接地故障、三相接地故障等四类故障工况, 并在 PSCAD/EMTDC 上对每种工况进行 100 次随机故障初相角的短路故障实验。平均检测时间为 100 次随机短路实验的检测时间的平均值, 四种方法检测结果如表 6 所示。分别设置信噪比为 1 dB、5 dB、10 dB 的高斯白噪声, 谐波含量为 10%、20%、30% 的三次谐波, 负荷投切容量分别为 200 MW、500 MW、800 MW 的工况, 对四种检测方法进行测试, 测试结果如表 7 所示。

表 6 不同故障工况下四种方法检测结果

Table 6 Test results of four algorithms under different fault conditions

仿真 工况	故障点 位置	平均检测时间/ms			
		瞬时值 方法	斜率 方法	突变量 方法	三相电流平方 和比值方法
单相 短路	线路首端	2.9	2.3	2.8	1.9
	线路中间	3.7	2.5	3.4	2.1
	线路末端	4.3	3.1	3.9	2.3
两相相 间短路	线路首端	1.9	1.6	2.1	1.2
	线路中间	2.6	2.3	2.6	1.4
	线路末端	3.1	2.8	3.3	1.8
两相接 地短路	线路首端	1.9	1.5	2.1	1.1
	线路中间	2.2	2.2	2.4	1.4
	线路末端	2.9	2.8	3.1	1.7
三相 短路	线路首端	1.9	1.3	1.7	0.4
	线路中间	2.2	1.6	2.1	0.6
	线路末端	2.4	1.9	2.3	0.8

表 7 不同干扰工况下四种方法检测结果

Table 7 Test results of four algorithms under different interference conditions

干扰 工况	干扰 参数	响应情况			
		瞬时值 方法	斜率 方法	突变量 方法	三相电流平方 和比值方法
噪声	1 dB	×	○	×	×
	5 dB	×	○	×	×
	10 dB	×	○	×	×
谐波	10%	×	×	×	×
	20%	×	×	×	×
	30%	×	○	×	×
负荷 投切	200 MW	×	×	×	×
	500 MW	×	○	×	×
	800 MW	×	○	×	×

注: ○代表检测方法响应, ×代表检测方法未响应

从表 6 可以看出, 在线路末端发生单相短路故障时, 四种方法平均检测时间最长, 其中三相电流平方和比值检测方法检测时间为 2.3 ms, 在四种方法中检测时间最短。在线路首端发生三相短路故障时, 四种方法平均检测时间最短, 其中三相电流平方和比值检测方法检测时间为 0.4 ms, 在四种方法中检测时间最短。综合比较可知, 三相电流平方和比值检测方法在快速性上优于其余三种检测方法。

从表 7 可以看出, 斜率检测方法在噪声、谐波及负荷投切等工况下容易误响应, 三相电流平方和比值检测方法、电流瞬时值及电流突变量检测方法则不会误响应, 抗干扰性更好。

4 结论

本文给出了一种基于三相电流平方和比值的短路故障快速检测方法, 推导了三相短路故障时三相电流平方和表达式, 给出了识别判据及故障检测流程, 在仿真分析中, 与当前常用的三种检测方法进行了比较, 得出以下结论:

1) 三相电流平方和比值检测方法在不同故障工况、不同故障点位置下均具有良好的适应性与故障识别能力。对于三相短路故障, 该方法识别速度极快, 检测时间不超过 0.8 ms, 且不受故障初相角影响; 对于不对称短路故障, 总体检测时间不超过 5 ms; 相对电流瞬时值、电流突变量及电流斜率三种检测方法, 该方法识别速度更快。

2) 三相电流平方和比值检测方法检测量峰值及检测时间均受过渡电阻条件影响, 并且过渡电阻越大, 检测量峰值越小, 检测时间越久。当过渡电阻过大时, 短路电流水平较低, 此时限流器不需要投入。

3) 对于空载线路合闸工况, 三相电流平方和闭锁判据能有效闭锁, 三相电流平方和比值检测方法不会误响应; 对于谐波, 理论与仿真测试均证明了该方法不受谐波影响; 对于噪声, 该方法不会误响应。综合可知, 该方法具有良好的抗干扰性。

参考文献

- [1] 李力, 李爱民, 吴科成, 等. 广东电网短路电流超标问题分析和限流措施研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(增刊): 20-24.
- [2] LI Li, LI Aimin, WU Kecheng, et al. Analysis of short-circuit current exceeding standard of Guangdong power grid and research on limitation measures[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(S): 20-24.
- [3] 廖国栋, 谢欣涛, 侯益灵, 等. 特高压接入湖南电网后 500 kV 母线三相短路电流超标问题分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 747-753.
- [4] LIAO Guodong, XIE Xintao, HOU Yiling, et al. Analysis on the problems of three-phase short-circuit current over-limited of 500 kV bus when UHV connected to Hunan Power Grid[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 747-753.
- [5] 王华晞, 习贺勋, 汤广福, 等. 面向超高压电网的故障限流器的应用研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 99-102.
- [6] WANG Huaxin, XI Hexun, TANG Guangfu, et al. Application research of fault current limiter on the EHV grid[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 99-102.
- [7] 郑健超. 故障电流限制器发展现状与应用前景[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5140-5148.
- [8] ZHENG Jianchao. Current status and application prospect of fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5140-5148.
- [9] 刘云飞, 周启文, 方太勋, 等. 故障限流器控制系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 150-156.
- [10] LIU Yunfei, ZHOU Qiwen, FANG Taixun, et al. Design and implementation of control system for fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 150-156.
- [11] 刘凯, 陈红坤, 林军, 等. 故障限流器在电力系统中应用研究现状[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 147-151.
- [12] LIU Kai, CHEN Hongkun, LIN Jun, et al. Study situation of applications of fault current limiter in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 147-151.
- [13] 武守远, 戴朝波, 金雪芬. 故障电流限制技术及其新进展[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 24-32.
- [14] WU Shouyuan, DAI Chaobo, JIN Xuefen. Fault current limiting measures and their recent progress[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 24-32.
- [15] 戴朝波. 故障电流限制器用故障识别技术综述[J]. 智能电网, 2014, 2(3): 22-29.
- [16] DAI Chaobo. Review on fault detection method for fault current limiter[J]. Smart Grid, 2014, 2(3): 22-29.
- [17] 缪希仁, 李飙, 吴晓梅, 等. 基于短路早期检测的中压故障电流快速限制技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 75-81.
- [18] MIAO Xiren, LI Biao, WU Xiaomei, et al. Research status and perspective of fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 75-81.
- [19] MUSA M H H, HE Zhengyou, FU Ling, et al. A

- cumulative standard deviation sum based method for high resistance fault identification and classification in power transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 3(3): 291-302. DOI: 10.1186/s41601-018-0102-4.
- [12] 吴浩伟, 周樑, 孙朝晖, 等. 电力系统短路故障快速检测方案研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(24): 88-92.
WU Haowei, ZHOU Liang, SUN Zhaohui, et al. Study on fast detecting scheme of power system short-circuit fault[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(24): 88-92.
- [13] 吕哲, 王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(6): 18-26.
LÜ Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 18-26.
- [14] DU F, CHEN W, ZHUO Y, et al. A new method of early short circuit detection[J]. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, 2(4): 432-437.
- [15] 杨尚瑾, 武守远, 戴朝波, 等. 短路故障快速识别方法综述[C] // 第四届电能质量及柔性输电技术研讨会论文集, 2012, 中国, 呼和浩特: 455-462.
YANG Shangjin, WU Shouyuan, DAI Chaobo, et al. Summary of short-circuit fault identification methods[C] // *Proceedings of the 4th Symposium on Power Quality and Flexible Transmission Technology*, 2012, Hohhot, China: 455-462.
- [16] 李炳绪, 李兴斌, 陈思磊. 短路故障快速检测方法综述[J]. *电器与能效管理技术*, 2018(2): 1-10.
LI Bingxu, LI Xingbin, CHEN Silei. Review on fast short-circuit fault detection methods[J]. *Apparatus and Energy Efficiency Management Technology*, 2018(2): 1-10.
- [17] 金雪芬, 戴朝波, 武守远, 等. 根据线路电流斜率快速识别故障信号的方法[J]. *电网技术*, 2009, 33(9): 29-34.
JIN Xuefen, DAI Chaobo, WU Shouyuan, et al. Fast fault signal identification method using line current slope[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(9): 29-34.
- [18] 金雪芬. 500 kV 超高压电网故障电流限制器故障信号识别与保护配合问题的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
JIN Xuefen. Study of fault signal identification and protection co-operation of fault current limiter in 500 kV power grid[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2009.
- [19] 杨尚瑾, 武守远, 戴朝波. 基于电流波形曲率的短路故障快速识别方法[J]. *电网技术*, 2013, 37(2): 551-556.
YANG Shangjin, WU Shouyuan, DAI Chaobo. A method to fast recognize short-circuit fault based on curvature of line current waveform[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(2): 551-556.
- [20] 李波, 江亚群, 侯立峰, 等. 利用波形曲率识别变压器励磁涌流的新方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2010, 22(6): 93-98.
LI Bo, JIANG Yaqun, HOU Lifeng, et al. Novel method to identify transformer inrush current based on the curvature characteristics of waveform[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2010, 22(6): 93-98.
- [21] 裴喜平, 郝晓弘, 陈伟, 等. 基于对称分量估计的电压暂降特征量实时检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(11): 82-92.
PEI Xiping, HAO Xiaohong, CHEN Wei, et al. A real-time detection method of the voltage sag characteristics based on symmetrical components estimation[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(11): 82-92.
- [22] 郑清水, 马志瀛, 钱华. 一种短路电流快速识别电路的研究[J]. *电工技术学报*, 2004, 19(3): 99-102.
ZHENG Qingshui, MA Zhiying, QIAN Hua. Research on a fast identified circuit of short-circuit current[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2004, 19(3): 99-102.
- [23] KOLEY E, KUMAR R, GHOSH S. Low cost microcontroller based fault detector, classifier, zone identifier and locator for transmission lines using wavelet transform and artificial neural network: a hardware co-simulation approach[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 81: 346-360.
- [24] 赵阳, 魏新劳, 冯越. 用于混合式断路器的神经网络故障电流检测方法[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2011, 16(1): 53-56.
ZHAO Yang, WEI Xinlao, FENG Yue. Fault current detection based on neural network in hybrid circuit breaker[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2011, 16(1): 53-56.

收稿日期: 2020-01-18; 修回日期: 2020-05-25

作者简介:

李奕璋(1996—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护、短路故障检测与辨识技术; E-mail: 86808598@qq.com

陈红坤(1967—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网运行与控制、电力系统安全评估、电能质量分析与环境评估。

(编辑 张爱琴)