

基于瞬时能量比的输电线路故障选相方案

陈亚, 李梦诗

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 提出了一种新的电力系统输电线路的故障选相方案。该方案首先构造了电流、电压信号的一种虚拟的瞬时能量; 然后利用电流与电压的瞬时能量的比值构成瞬时能量比, 作为故障选相的指标; 最后将这些指标值与相应的阈值作比较完成故障选相。在 PSCAD/EMTDC 搭建了一个典型的双端供电的电力系统模型对所提出的方案进行仿真验证。仿真结果表明, 所提出的故障选相方案能够在不同的故障电阻、故障位置和故障初始角等故障情况下正确地完成故障选相, 并且具有响应速度快、抗高斯白噪声、抗高过渡电阻等优点。

关键词: 故障选相; 瞬时能量比; PSCAD/EMTDC; 高斯白噪声; 抗高阻

A faulted phase selection scheme for transmission lines based on instantaneous energy ratio

CHEN Ya, LI Mengshi

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper proposes a new faulted phase selection scheme for transmission lines in power systems. The proposed scheme originally develops a virtual instantaneous energy for the current and voltage signals; then utilizes the ratio of the instantaneous energy of current to that of the voltage as an index for phase selection; finally compares the indexes with their corresponding thresholds to select the faulted phases. A typical double source-supplied power system is established in PSCAD/EMTDC to verify the proposed scheme. The simulation results have demonstrated that the proposed method can select the faulted phases correctly under different fault conditions such as different fault resistances, fault locations and fault inception angles. Moreover, it has a considerable fast respond speed to a fault, is immune to white Gaussian noise and tolerant of high fault resistances.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307062) and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. S2013040016964).

Key words: faulted phase selection; instantaneous energy ratio; PSCAD/EMTDC; white Gaussian noise; tolerant of high resistances

中图分类号: TM771

文章编号: 1674-3415(2016)01-0056-09

0 引言

电力系统高压输电线路由于其长度较长, 是电力系统中最容易出现故障的元件之一, 很多学者和研究人员都非常关注输电线路的保护, 做了很多的研究和创新^[1-7]。继电保护和自动重合闸对于线路的保护和提高电力系统的稳定性有着十分重要的意义。然而在将他们运用到输电线路之前, 首要的工作是应该快速、准确地选出故障相。

传统的输电线路故障选相方案, 主要是基于稳量^[2], 这些方案算法简单, 容易实施。但是由于稳态量的计算需要一个工频周期的采样值^[8], 延时较长, 不能加速保护装置的动作^[9-10]和满足电力系统暂态稳定性的要求^[11], 而且性能容易受系统运行方式和过渡电阻等的影响^[12]。

在故障瞬间, 电压电流信号中会产生大量的暂态分量, 这些暂态分量中蕴含着丰富的故障信息^[9], 许多学者由此开发出了基于这些暂态分量的故障选相算法。作为提取信号暂态特征的一种有力工具, 小波变换^[13]被广泛用于电力系统的故障选相中。文献^[14]提出了一种基于小波变换的输电线路

基金项目: 国家自然科学基金(青年基金, 51307062); 广东省自然科学基金(博士启动基金, S2013040016964)

故障选相的方法, 结合小波变换和相模变换构造出选相指标, 再根据选相判据来实现故障选相, 但选相判据复杂; 文献[15]也提出了一种基于小波变换的输电线路故障检测算法, 仿真表明利用小波变换可以快速有效地完成输电线路的故障检测和分类。然而这些算法性能的好坏很大程度上取决于母小波的选取^[16], 具有一定的局限性, 不够灵活。

除了基于小波变换的算法, 一些智能算法也应用到了电力系统的故障选相中。文献[17]提出了一种基于人工神经网络的故障选相算法, 通过事先使用故障样本对网络中的参数进行训练和优化, 建立起故障信号和故障类型之间的对应关系, 完成故障选相; 文献[18]提出了一种基于模糊逻辑的故障选相算法, 该算法不需要事先整定, 并且不受故障电阻、故障类型的影响, 具有很强的鲁棒性。

一些混合的方法也被开发了出来用于故障选相, 例如小波变换和模糊逻辑相结合的方法^[19], 这种算法吸收了小波变换的具有较强的暂态特征提取的能力和模糊逻辑具有的智能推理的能力的优点, 能有效地完成输电线路的故障选相。但是基于智能算法的故障选相方案事先需要较大的数据样本来进行训练^[10], 并且不能保证数据样本包含所有的故障情形, 可能导致在某些极端情况下对故障的误判。

考虑了上述输电线路故障选相算法中存在的问题, 本文提出了一种新的、计算量小的故障选相方案。该方案首次提出了瞬时能量以及瞬时能量比的概念, 在分别算得输电线路两端的瞬时能量比后, 与相应的阈值作比较, 完成故障选相。

文章的结构如下: 第1节给出了瞬时能量比的定义, 介绍了本文的故障选相算法, 也讨论了一些参数的设置; 第2节采用 PSCAD/EMTDC 搭建了一个典型的双端电源供电的电力系统, 在不同的故障条件下对本文所提出的算法进行了仿真验证; 最后一节对本文进行了总结。

1 瞬时能量比及其在线路保护中的运用

1.1 瞬时能量的定义

瞬时能量(Instantaneous Energy, IE)是本文构造的一种虚拟能量, 指信号相隔 1/4 工频周期的两个采样点的数值的平方和。本文中的工频即系统频率, 为 50 Hz。假设信号为 $s(t)$, 在 t 时刻的瞬时能

量为 $I(t)$, 于是 $I(t)$ 的表达式为

$$I(t) = s^2(t) + s^2\left(t - \frac{T}{4}\right) \quad (1)$$

电力系统正常工作时, 线路中的电压和电流信号均为正弦波, 假设其信号 $s(t)$ 表达为

$$s(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中: A , ω , φ 分别代表信号 $s(t)$ 的幅值、角频率和初相角; $\omega = 2\pi f$, f 是系统频率。根据式(1)算得正常时 $s(t)$ 的瞬时能量为

$$I(t) = [A \sin(\omega t + \varphi)]^2 + [A \sin(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2})]^2 = A^2 \quad (3)$$

从式(3)可以知道, 正弦信号的瞬时能量是一个常数, 即幅值的平方。如果线路发生了故障, 电压和电流信号将不再是正弦波, 此时, 故障相电压会下降, 电流会上升。

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 1 所示的简单三相电力系统, 在 0.5 s 设置了一个发生在线路中点处的 A 相金属性接地故障, 图 2 和图 3 画出了故障前后的三相电压和电流波形。

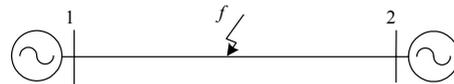


图 1 PSCAD/EMTDC 中搭建的简单模型

Fig. 1 A simple model established in PSCAD/EMTDC

由图 2、图 3 可以看出, 当线路发生短路故障时, 将会导致故障相电流的上升和电压的降低, 因此, 故障相的电流的瞬时能量会升高, 电压的瞬时能量会降低。为了清楚地表示出故障后的电压和电流的瞬时能量的变化, 仍采用图 1 所示的电力系统模型, 设置了一个于 0.5 s 发生在线路中点处的 AB 两相短路故障, 图 4 和图 5 给出了故障前后的故障相的电压、电流以及其瞬时能量的波形。

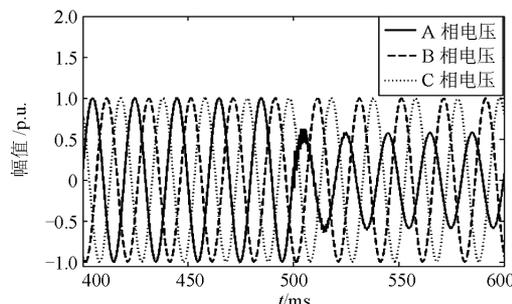


图 2 A 相故障时的三相电压波形

Fig. 2 Voltage waveforms of the three phases under a phase A-to-ground fault

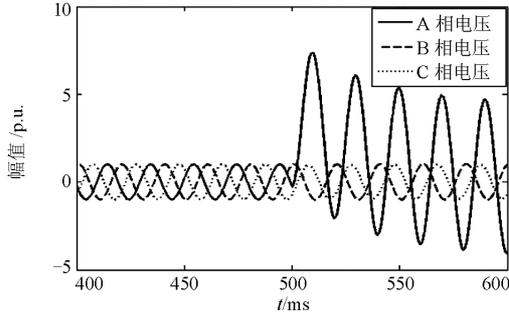


图3 A相故障时的三相电流波形

Fig. 3 Current waveforms of the three phases under a phase A-to-ground fault

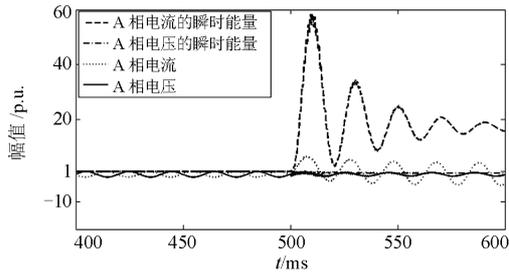


图4 A相的电压电流波形以及其瞬时能量

Fig. 4 Waveforms of phase A' voltage, current and their corresponding IEs

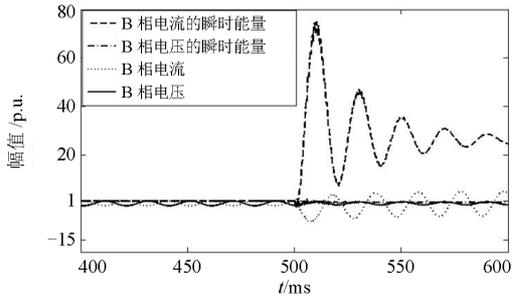


图5 B相的电压电流波形以及其瞬时能量

Fig. 5 Waveforms of phase B' voltage, current and their corresponding IEs

从图4和图5可以看出,在故障前,A、B两相的电压和电流的瞬时能量都是接近于1。当发生故障后,电流的瞬时能量迅速增大,而电压的瞬时能量略微减小。对其他类型的故障也做了相同的测试,得到了类似的结果,限于篇幅,这里就不一一列出结果了。必须提到的是,本文中的电气量都已经归一化成了标么值。

1.2 瞬时能量比的定义

瞬时能量比(Instantaneous Energy Ratio, IER)

是为三相信号(电压或者电流信号)和零序分量而定义的。某一相 Ψ ($\Psi \in \{A, B, C\}$)的瞬时能量比定义为这一相的电流的瞬时能量与电压的瞬时能量的比值,即

$$R_{\Psi}(t) = \frac{I_{\Psi c}(t)}{I_{\Psi v}(t)} \quad (4)$$

式中: $R_{\Psi}(t)$ 表示 Ψ 相的瞬时能量比; $I_{\Psi c}(t)$ 和 $I_{\Psi v}(t)$ 分别代表 Ψ 相的电流和电压的瞬时能量。

零序分量的瞬时能量比记作 $R_0(t)$, 定义为零序电流分量的瞬时能量和标么值基准1的比值, 即

$$R_0(t) = \frac{I_{0c}(t)}{1} = I_{0c}(t) \quad (5)$$

式中, $I_{0c}(t)$ 表示零序电流的瞬时能量。

正常情况下,每一相的瞬时能量比都接近于1。如果发生了故障,如1.1节中所述,故障相电流的瞬时能量会增加,而电压的瞬时能量会降低,因此故障相的瞬时能量比将会增大。图6画出了当图1所示的电力系统在线路中点处于0.5s发生A相金属性接地短路时A、B、C三相以及零序分量的瞬时能量比的曲线。

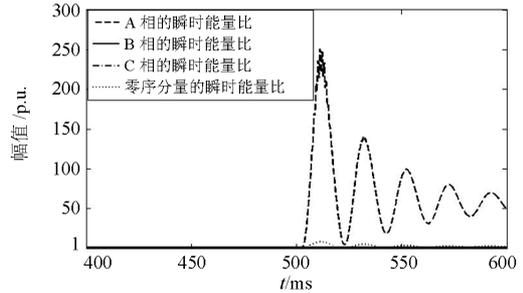


图6 三相以及零序分量的瞬时能量比曲线

Fig. 6 Curves of the IERs of three phases and the zero-sequence component

从图6可以很明显地看出,在故障发生前,A、B、C三相的瞬时能量比都接近于1,零序的瞬时能量比接近于0;发生故障后故障相A相的瞬时能量比迅速增大,而非故障相即B、C两相在故障后几乎没发生变化;由于是接地短路,所以零序分量的瞬时能量比在故障后也迅速增大。对其他的故障类型也做了类似的测试,得到了类似的结果。因此,利用瞬时能量比在故障前后的差异可以区分出故障相和正常相,下面将详细介绍本文基于瞬时能量比的故障选相方案。

1.3 本文的故障选相方案

假设安装在线路两端的选相元件通过可靠的

通信装置彼此联系着, 即任意一端检测到了故障相, 就会向另外一端发送故障相检测信号。因此, 如果线路某一端的选相元件检测到了故障, 那么这一端在启动本侧保护跳闸的同时也会通过通信装置向对侧的选相元件发送同样的故障检测信号, 从而使得对侧的保护装置也能启动跳闸, 切除故障。之所以在线路两侧都安装上彼此联系的通信装置是为了保证发生故障后, 如果线路某一侧的保护装置不能检测到故障, 那么它仍然可以通过接收到对侧选相元件处的通信装置发来的故障相信息来完成选相, 从而启动跳闸。这种情形通常在有高阻接地故障的条件下发生。下面通过一个例子简要说明一下这种情形。在图 1 所示的系统中设置一个通过 300Ω 接地的 A 相接地故障, 故障于 0.5 s 发生在线路的中点处, 图 7 画出了线路两端处的瞬时能量比的曲线。

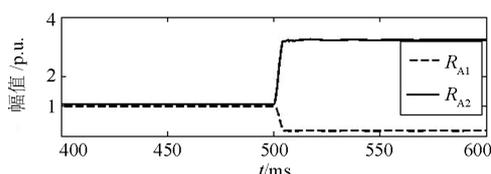


图 7 线路 1 和 2 端的 A 相瞬时能量比曲线

Fig. 7 Curves of phase A's IERs at side 1 and side 2 of the transmission line

图 7 中, R_{A1} 和 R_{A2} 分别代表输电线路 1 端和 2 端处 A 相的瞬时能量比。从图中可以发现, 线路两端的瞬时能量比 R_{A1} 和 R_{A2} 在故障发生后并没有都上升, R_{A1} 反而下降了。在这种情况下, 即使 1 端的保护不能检测到故障, 但是仍能通过接收到 2 端发送的故障信号而准确选相, 从而启动跳闸, 切除故障。因此, 安装在线路两端的通信装置在很大程度上提高了选相元件和保护装置的可靠性。需要提到的是, 故障检测信号是以电磁波的形式发送出去的, 而电磁波以光速传播。考虑一段长 100 km 的输电线路, 信号从线路一端传到另一端所需的时间大约为 0.333 ms , 这对于故障选相的整体延时影响很小, 不影响选相的快速性。

基于上述的假设, 本文所提出的基于瞬时能量比的故障选相方案表述如下。

1) 分别计算线路两端处各相以及零序分量的瞬时能量比 $R_{A1}(n), R_{B1}(n), R_{C1}(n), R_{01}(n), R_{A2}(n), R_{B2}(n), R_{C2}(n)$ 和 $R_{02}(n)$, 并且对其进行去噪处理。上述 8 个瞬时能量比是式(4)、式(5)所定义的瞬时能

量比的离散形式。在实际中, 由于在保护装置处测得的电压、电流信号中会存在噪声, 这些噪声会导致测得的瞬时能量比会稍微偏离其实际值。为了去除噪声的影响, 对所得到的线路两端的瞬时能量比做如下的处理。

$$r(n) = \frac{R(n) + R(n-1) + \dots + R(n-m+1)}{m} \quad (6)$$

式中: $R(n)$ 代表上述线路两侧 8 个瞬时能量比中的任何一个; $r(n)$ 代表去噪后的结果; m 是数据窗长。经过大量的尝试, 发现当 $m=10$ 时, 既能保证良好的去噪性能, 同时又能保证较小的计算量。

2) 为 $r(n)$ 设定合适的阈值, 完成故障选相。如上文所提到的, 电力系统正常工作时, 每一相的瞬时能量比都接近于 1。当发生故障后, 故障相的瞬时能量比将会上升。因此, 通过选取适当的阈值便可以判别出故障相。本文中设定了两个固定的阈值和一个动态的阈值来进行故障相的判别。其中一个固定阈值, 记作 ε_1 , 用来预报故障时刻; 另外一个固定阈值记作 ε_2 , 用来检测是否存在零序分量; 动态阈值记作 ε_3 , 用来检测故障相。基于上述所设定的三个阈值, 选相的过程按照下面三个步骤来实施。

步骤 1 监测输电线路两端处三相的瞬时能量比, 如果这六个瞬时能量比中的任何一个超过了 ε_1 , 表示系统中有故障发生。

步骤 2 延时 1 ms 后判断故障是否为接地故障。延时 1 ms 的原因是为了等待故障相以及零序分量的瞬时能量比上升到足够可以检测出来的程度。在延时 1 ms 后计算出线路两端的零序分量的瞬时能量比, 如果它们中的任何一个超过了阈值 ε_2 , 表示接地故障发生, 否则故障为相间故障。

步骤 3 根据步骤 2 中得到的线路两端的零序分量的瞬时能量比来分别决定两端的动态阈值 ε_{31} 和 ε_{32} , 再将线路 1 端的三相的瞬时能量比即 $R_{A1}(n), R_{B1}(n), R_{C1}(n)$ 和 ε_{31} 作比较, 将 2 端的三相的瞬时能量比 $R_{A2}(n), R_{B2}(n), R_{C2}(n)$ 和 ε_{32} 作比较, 如果任何一端的任何一相的瞬时能量比超过了其相应的阈值, 那么这一相便被判定为故障相。

下面进行三个阈值的设置。考虑到选相元件既要躲过正常工作时各相的瞬时能量比即 1, 又要对故障有较为灵敏的反应能力, 经过大量的试验, $\varepsilon_1 = 1.5$ 可以满足选相的可靠性和灵敏度的要求。在相间故障和正常情况下零序分量在理论上应该为 0, 而实际中由于系统可能存在轻微的三相不平衡^[20]以及噪声的干扰, 即使在相间故障以及正常情况下都有可能存在很小的零序分量, 因此 ε_2 应该设

置得稍微大于零,一方面是为了躲过由于噪声和三相不平衡所引起的零序分量的不平衡量,另一方面是为了加速在有接地故障情况下对接地故障的检测。经过试验, $\varepsilon_2 = 0.005$ 可以满足要求。在对故障相的判别上采用动态阈值,而不采用固定阈值,考虑的主要问题是相间的互耦效应^[19]。在故障电流很小时,相间互耦效应很弱,阈值应该适当地小;而在故障电流很大时,相间的互耦效应很强,阈值应该适当地大,保证不要误选了正常相。经过大量的试验表明,在互耦很弱时的阈值设定为 1.5 以及在互耦很强时阈值设定为 5 可以满足要求。本文采用零序分量的瞬时能量比 r_0 来定量地表示互耦效应,并且经过试验选取 $r_0 = 0.01$ 和 $r_0 = 0.06$ 作为互耦很弱的上界和互耦很强的下界,当零序分量的瞬时能量比处于 0.01 到 0.06 之间的情况时,阈值采用线性插值的办法来求得,于是动态阈值 ε_3 的表达式为

$$\varepsilon_3 = \begin{cases} 1.5 & 0 \leq r_0 < 0.01 \\ 70(r_0 - 0.01) & 0.01 \leq r_0 < 0.06 \\ 5 & r_0 \geq 0.06 \end{cases} \quad (7)$$

最后,选相方案的流程图如图 8 所示。

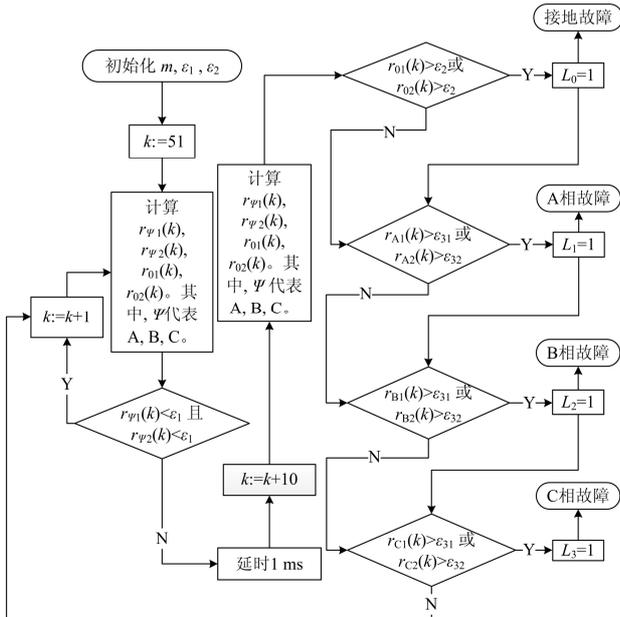


图 8 故障选相流程图

Fig. 8 Flowchart of faulted phase selection

图 8 中, L_1 、 L_2 、 L_3 分别表示 A、B、C 三相是否有故障的逻辑变量,初始值为 0,发生故障之后置为 1; L_0 表示是否为接地故障的逻辑变量,0 表示非接地故障,1 表示接地故障。

必须提到的是,本文的系统频率为 50 Hz,采样频率设定为 10 kHz,即一个周期采样 200 个点。根

据式(1)、式(4)、式(5),瞬时能量比的计算需要两个时差为 1/4 的工频周期的点来计算,即相隔 50 个采样点的两个点。因此,图 8 中的采样点开始于第 51 个。

2 仿真研究

2.1 仿真模型

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了一个典型的双端电源供电的电力系统模型用于仿真研究,模型见于图 9,其中电力系统的系统频率为 50 Hz,输电线路的电压等级为 230 kV,线路长 100 km,线路以及电源的参数也标在了图中。为了让仿真结果更接近实际情况,在由 PSCAD 产生的原始的电压和电流信号中加入了 40 dB 的高斯白噪声来对本文的算法进行验证。下面就对各种故障情况进行仿真研究。

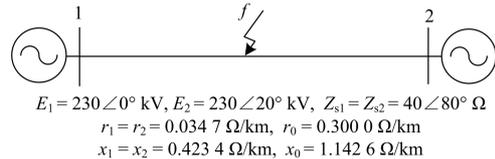


图 9 仿真模型

Fig. 9 Simulation model

2.2 基于不同故障电阻的仿真研究

在图 9 所示的仿真模型中设置了一系列通过不同的故障电阻接地的接地故障对算法进行验证,总仿真时间为 1 s,故障时刻设定为 0.5 s,故障位置为线路的中点处。其中故障电阻值从 0 Ω 以 50 Ω 的增幅增加到 200 Ω。针对每个故障电阻值,考察了在三种典型的接地故障即单相接地故障(AG)、两相接地故障(ABG)和三相接地故障(ABCG)情况下所提出方案的故障选相的性能。仿真结果见于表 1,其中能够反映出故障类型的数据都被加粗强调了, R_f 表示故障电阻值,第三列中的 1 表示线路的 1 端,即左端; 2 表示线路的 2 端,即右端,最后一列中的延时表示从故障发生到检测到故障所需要的时间。从表 1 可以看出,所提出的算法在不同的故障电阻下对不同故障类型都能准确地进行识别,并且延时都在 7.1 ms 之内,具有很高的响应速度。

2.3 基于不同故障位置的仿真研究

在本次仿真中,故障位置是从线路 1 端作为起始点,从 1 km 开始,以 25 km 的步长逐渐增至 100 km。针对每一个故障位置设置了三种典型的金属性故障即 A 相接地短路(AG)、AB 两相短路(AB)和 ABC 三相短路进行仿真研究,故障的时间均设

表 1 不同故障电阻下的各种故障情况下的选相结果

Table 1 Faulted phase selection results under different faults via different fault resistances

R_f/Ω	故障类型	线路端	线路 1 端或者 2 端各相以及零序分量的瞬时能量比的最大值和相应的阈值					选相结果	延时/ms
			A	B	C	0	ε_3		
0	AG	1	245.9	1.1	1.0	8.3	5.0	AG	3.8
		2	518.6	1.2	1.1	11.8	5.0		
	ABG	1	1 569.0	1 246.0	1.1	4.2	5.0	ABG	3.1
		2	12 857.0	2 515.0	1.1	6.0	5.0		
	ABCG	1	565.2	1 094.4	3 184.4	1e-3	1.5	ABCG	2.4
		2	1 439.0	3 931.1	2 080.2	1e-3	1.5		
50	AG	1	6.4	1.0	1.0	0.9	5.0	AG	6.8
		2	27.8	1.1	1.1	1.4	5.0		
	ABG	1	5.9	12.2	1.1	0.8	5.0	ABG	7.1
		2	27.3	73.4	1.1	1.1	5.0		
	ABCG	1	7.4	46.5	7.0	2e-4	1.5	ABCG	3.6
		2	31.0	489.9	30.4	7e-4	1.5		
100	AG	1	1.0	1.0	1.0	0.3	1.5	AG	2.8
		2	11.0	1.1	1.1	0.46	5.0		
	ABG	1	1.0	2.3	1.0	0.3	5.0	ABG	6.3
		2	11.0	16.3	1.1	0.4	4.6		
	ABCG	1	1.0	2.0	1.2	1e-4	1.5	ABCG	6.3
		2	11.2	19.1	11.2	3e-4	1.5		
150	AG	1	1.0	1.0	1.0	0.2	1.5	AG	3.4
		2	6.5	1.1	1.1	0.2	4.9		
	ABG	1	1.0	1.6	1.0	0.1	1.5	ABG	2.0
		2	6.5	11.0	1.1	0.2	2.8		
	ABCG	1	1.0	1.6	1.1	1e-4	1.5	ABCG	1.4
		2	6.7	11.9	7.3	2e-4	1.5		
200	AG	1	1.0	1.0	1.0	0.09	1.5	AG	3.5
		2	4.8	1.1	1.1	0.13	4.0		
	ABG	1	1.0	1.4	1.1	0.09	1.5	ABG	2.6
		2	4.7	7.7	1.1	0.13	3.0		
	ABCG	1	1.0	1.5	1.1	1e-5	1.5	ABCG	1.6
		2	4.9	8.4	5.5	2e-4	1.5		

置在 0.5 s, 表 2 列出了仿真结果。从表 2 可以看出本文的选相方案对发生在线路不同位置的不同故障都能够进行准确地识别, 并且所有的故障都能在故障发生 4.2 ms 之内检测出来, 故障检测的延时很

小, 证明本文的选相方案的性能几乎不受故障位置的影响。

2.4 基于不同故障初始角的仿真研究

文献[21]证明了不同的故障初始角能够导致不

同的暂态能量。此外，故障的检测延时也会受到故障初始角的影响。因此，有必要测试本文的算法在不同的故障初始角的情况下的性能。本文中的故障初始角是以线路左侧保护处 A 相电压的过零点作为相角的参考点，设置的故障类型为 A 相金属性接地故障，故障位置为线路中点处。故障初始角从 0°

开始以 60°的步长增加至 180°，表 3 给出了在这些不同的故障初始角的情况下的选相结果。从表 2 中可以看出在各种故障初始角的情况下，本文的方法都能准确地选出故障相，并且选相的延时在 7 ms 以内。对于其他类型的故障也做了类似的仿真研究，得到了类似的结果。

表 2 不同故障位置下的故障选相结果

Table 2 Faulted phase selection results under different fault locations

L_f/km	故障类型	线路端	线路 1 端或者 2 端各相以及零序分量的瞬时能量比的最大值和相应的阈值					选相结果	延时/ms
			A	B	C	0	ϵ_3		
1	AG	1	2 800	1.3	2.6	25.1	5.0	AG	3.2
		2	135.0	1.4	3.0	3.7	5.0		
	AB	1	4 163.4	3 365.0	1.0	1e-5	1.5	AB	2.0
		2	332.4	89.3	1.1	3e-4	1.5		
	ABC	1	8.9e3	1.7e3	1.1e3	1e-4	1.5	ABC	2.0
		2	283.0	585.5	697.5	7e-4	1.5		
25	AG	1	517.4	1.1	1.6	13.4	5.0	AG	3.5
		2	218.7	1.2	1.7	6.5	5.0		
	AB	1	675.3	1 218.5	1.0	1e-4	1.5	AB	2.5
		2	506.0	168.4	1.1	5e-4	1.5		
	ABC	1	1 348.0	7.1e4	1.7e4	1e-4	1.5	ABC	2.3
		2	527.4	779.2	1.1e3	1e-4	1.5		
50	AG	1	219.6	1.1	1.0	7.7	5.0	AG	3.9
		2	468.1	1.2	1.1	11.0	5.0		
	AB	1	262.4	412.3	1.0	5e-4	1.5	AB	2.4
		2	764.7	565.8	1.1	6e-4	1.5		
	ABC	1	543.1	1 339.0	2.4e3	1e-4	1.5	ABC	2.4
		2	1.4e3	2.2e3	1.2e4	1e-4	1.5		
75	AG	1	123.4	2.0	1.0	4.5	5.0	AG	4.2
		2	1 582.1	2.0	1.1	20.1	5.0		
	AB	1	157.1	160.9	1.0	4e-4	1.5	AB	2.6
		2	1.3e3	6.1e3	1.1	1e-4	1.5		
	ABC	1	291.3	1.3e3	1.6e3	5e-4	1.5	ABC	2.7
		2	7.0e3	1.4e4	3.8e4	1e-4	1.5		
100	AG	1	89.3	3.6	1.0	2.2	5.0	AG	4.4
		2	3.2e5	3.5	1.1	43.3	5.0		
	AB	1	87.1	311.6	1.0	3e-4	1.5	AB	2.6
		2	1.6e3	843.0	1.1	2e-3	1.5		
	ABC	1	203.8	519.4	398.2	6e-4	1.5	ABC	3.0
		2	7e6	7.9e7	4.4e6	3e-3	1.5		

表 3 不同故障初始角下的故障选相结果

Table 3 Faulted phase selection results with under different fault inception angles

故障初始角/deg	线路端	线路 1 端或者 2 端各相以及零序分量的瞬时能量比的最大值和相应的阈值					选相结果	延时/ms
		A	B	C	0	ϵ_3		
0	1	245.9	1.1	1.0	8.3	5.0	AG	3.8
	2	518.6	1.2	1.1	11.8	5.0		
60	1	3 559.0	1.2	1.1	3.5	5.0	AG	2.5
	2	81 256.0	1.2	1.2	5.0	5.0		
120	1	271.3	1.1	1.1	5.8	5.0	AG	6.6
	2	404.4	1.2	1.2	8.4	5.0		
180	1	247.0	1.1	1.0	8.3	5.0	AG	3.8
	2	508	1.2	1.1	12.0	5.0		

2.5 耐受过渡电阻能力的测试

为了验证本文选相方案的性能是否受过渡电阻的影响, 对其耐受过渡电阻的能力进行了进一步的测试。在图 9 所示的输电线路中设置了 A 相接地短路, 故障时间为 0.5 s, 故障位置设置在线路的中点, 故障电阻从 50Ω 开始以 50Ω 的步长增加至 1300Ω 。测试发现, 本文所提出的故障选相方案在 1250Ω 以内的故障电阻下都能准确地完成故障选相; 大于 1250Ω 时, 由于故障电阻对故障电流的衰减作用太强, 故障前后, 故障相的瞬时能量比变化不大, 小于了阈值, 已经检测不出来故障相了。记录了 1250Ω 以内的各种故障电阻情况下的故障检测延时, 图 10 给出了相应的曲线。从图 10 可以清楚地看出, 随着故障电阻的增大, 故障检测延时也在增大, 在 1200Ω 以内, 本文的选相方案都能在 6.5 ms 以内准确地完成故障类型的识别, 具有较快的响应速度, 说明了本文的选相方案具有很强的耐受过渡电阻的能力。

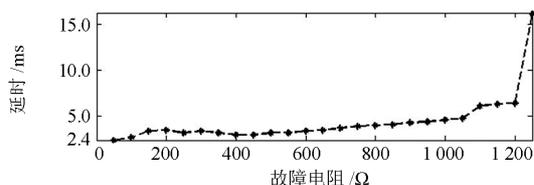


图 10 不同故障电阻情况下的故障选相延时

Fig. 10 Time delays of phase selection under different fault resistances

3 结语

本文提出了一种基于瞬时能量比的输电线路的故障选相方案。该方案利用在正常和故障情况下的各相的瞬时能量比的差异来对故障相进行识别。在

PSCAD/EMTDC 中搭建了一个典型的双端供电的电力系统模型, 设置了不同的故障情况来对该方案进行仿真验证。仿真结果表明所提出的方案在各种故障情况下都能够准确可靠地完成故障选相, 并且具有延时小、抗高斯白噪声等优点。另外, 通过进一步地对该方案进行耐受过渡电阻能力的测试, 表明了该方案能够在高过渡电阻的情况下正常工作, 具有很强的抗高过渡电阻的能力。随着通信技术的发展及其在电力系统中应用的普及, 本文所提出的方案由于计算量小, 可靠性高, 可能在输电线路的故障选相中具有一定的应用价值和潜力。

参考文献

- [1] ESZTERGALYOS-CHAIRMAN J, ANDRICHAK J, COLWELL D, et al. Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines-IEEE committee report[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1992, 7(1): 182-192.
- [2] 任志玲, 张媛媛. 基于改进的 HHT 变换和信心度的配电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 8-13.
- [3] REN Zhiling, ZHANG Yuanyuan. Fault line selection of distribution network based on improved Hilbert-Huang Transform and identification confidence degree[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 8-13.
- [4] 赖平, 周想凌, 邱丹. 小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选相方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 51-57.
- [5] LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method in indirectly grounding power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.
- [6] 闫光太, 梁甲文, 王新涛, 等. 利用暂态幅值故障测度的谐振电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015,

- 43(8): 64-68.
- YAN Guangtai, LIANG Jiawen, WANG Xintao, et al. A fault feeder selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 64-68.
- [5] 束洪春, 曹璞璘, 杨竞及, 等. 考虑互感器传变特性的输电线路暂态保护雷击干扰与线路故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 1-12.
- SHU Hongchun, CAO Pulin, YANG Jingji, et al. A method to distinguish between fault and lightning disturbance on transmission lines based on CVT secondary voltage and CT secondary current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 1-12.
- [6] 杨炼, 范春菊, 邵能灵, 等. 基于继电保护与改进算法的储能电站选址定容[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 53-60.
- YANG Lian, FAN Chunju, TAI Nengling, et al. Energy storage station locating and sizing based on relay protection and improved algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 53-60.
- [7] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264.
- CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A novel two terminal fault location method used ANN for UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [8] 吴镇扬. 数字信号处理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 45-64.
- [9] SILVA K, SOUZA B, BRITO N. Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 2058-2063.
- [10] HE Z Y, FU L, LIN S, et al. Fault detection and classification in EHV transmission line based on wavelet singular entropy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2156-2163.
- [11] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析: 上册[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [12] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [13] CHEN W, MALIK O P, YIN X, et al. Study of wavelet-based ultra high speed directional transmission line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1134-1139.
- [14] 王爱军, 李宏, 张小桃. 一种基于小波变换的超高压线路故障选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 92-97.
- WANG Aijun, LI Hong, ZHANG Xiaotao. A scheme of faulted phase selection in EHV transmission line based on wavelet transforms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 92-97.
- [15] CHAARI O, MEUNIER M, BROUAYE F. Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301-1308.
- [16] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 45-48, 76.
- HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Mother wavelet option method in the transient signal analysis of electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 45-48, 76.
- [17] 段晖. 基于神经网络的电力系统故障定位与诊断[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [18] DAS B, REDDY J V. Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 609-616.
- [19] YOUSSEF O A S. Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 582-589.
- [20] 马永翔. 电力系统继电保护[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.
- [21] COSTA F B, SOUZA B A, BRITO N S D. Effects of the fault inception angle in fault-induced transients[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(5): 463-471.

收稿日期: 2015-03-16; 修回日期: 2015-05-26

作者简介:

陈亚(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为继电保护, 电能质量; E-mail: c.y56@mail.scut.edu.cn

李梦诗(1982-), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制、启发式算法、芯片设计等。E-mail: mengshili@scut.edu.cn

(编辑 周金梅)