

基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法

姚海燕¹, 张静¹, 留毅¹, 潘姝², 徐贝³, 李题印¹, 周念成²

(1. 国网浙江杭州市余杭区供电公司, 浙江 杭州 311100; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 3. 国网资阳供电公司, 四川 资阳 641300)

摘要: 电力电缆早期故障主要为单相短路接地故障, 为避免其发展成永久性故障, 需要对电缆早期故障进行检测和识别。通过对比不同扰动源引起电缆过流的各相电流特性, 利用多尺度小波变换提取电缆早期故障电流的特征量, 以故障电流的高频细节系数、低频近似系数和模极大值组成复合判据, 检测电缆过流的暂态过程。构建电缆早期故障的时频特征向量, 利用灰色关联分析得到待测故障电流与标准电缆早期故障电流的关联度, 以识别电缆早期故障。最后, 利用 PSCAD/EMTDC 构建电缆线路模型, 通过仿真分析验证了该方法的正确性。

关键词: 电力电缆; 早期故障; 小波变换; 模极大值; 灰色关联分析

Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association

YAO Haiyan¹, ZHANG Jing¹, LIU Yi¹, PAN Shu², XU Bei³, LI Tiyin¹, ZHOU Niancheng²

(1. State Grid Zhejiang Hangzhou Yuhang Power Supply Company, Hangzhou 311100, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China; 3. Ziyang Power Supply Bureau, Ziyang 641300, China)

Abstract: Main power cable incipient faults are single phase short circuits with short duration and little effect on system operation, so the detection of cable incipient faults is needed to avoid them develop into permanent faults. The phase current characteristics of cable current caused by different disturbances are compared and the incipient faults current characteristic quantities are extracted by multi-scale wavelet transform, and fault current high frequency detail coefficients, low frequency approximation coefficients and the maximum module are taken as compound criterions to detect the transient process of cable over-currents. The time-frequency eigenvectors of cable incipient faults are created and the gray correlation analysis is used to obtain the relevancy of fault currents between fault currents of under-test and standard cable incipient faults in order to identify the incipient faults. At last, the cable line model is built in PSCAD/EMTDC, and the correction of the proposed method is verified by simulation analysis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277184).

Key words: power cable; incipient faults; wavelet transform; maximum module; gray correlation analysis

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)09-0115-09

0 引言

电力电缆作为传输和分配电能的重要设备, 在发电、输电和配电的各环节中广泛运用, 电缆安全

稳定运行直接影响着电力系统供电的可靠性。由于生产工艺、外界环境、运行时间等因素的影响, 电力电缆的绝缘会出现缺陷或老化现象, 这样会增大电缆故障潜在危险性^[1-3]。电力电缆早期故障是其绝缘损伤而引起的一种间歇性的电弧故障^[4], 对电缆的正常运行影响较小, 但是会引起电缆绝缘的不断恶化, 最终发展成为永久性故障, 直接影响电缆的正常运行。电缆早期故障包括单相的半周波和多周

基金项目: 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512711209); 国家自然科学基金资助项目(51277184)

波接地故障两种^[5], 在电缆故障还未发展成为永久性故障之前, 通过检测和识别不同类型电缆早期故障, 可对绝缘受损而发生早期故障的电缆进行针对性检修, 有效避免绝缘受损的进一步恶化而造成的永久性故障^[6-7]。因此, 研究电力电缆早期故障检测和识别方法, 对于减小停电损失和保障电力系统安全运行具有重要意义。

电缆早期故障主要利用电压和电流量的时域和频域特征进行检测^[3,8-11], 文献[3, 8]通过对电缆早期故障检测的现场测试分析, 指出电缆的过电流特征量是反映电缆早期故障的主要指标; 据此, 文献[9]通过时域法分析了电缆早期故障电流的正序、负序故障分量变化特性。电缆早期故障的间歇性电弧特性将使其故障电流出现显著的谐波分量, 利用小波分析可对电缆过电流扰动信号的时域和频域特征进行提取^[4,10-11], 文献[4]采用离散小波和复小波检测电缆早期故障的时间突变点, 但由于未形成递推判据, 无法用于早期故障的在线检测; 文献[11]针对不同类型短路故障引起的电缆过流提出其暂态过程检测的小波判据, 但实际系统中电缆过流扰动源还包括变压器、电容投切和电动机起动, 该方法会造成对这些扰动源引起的过流的误判, 因此电缆暂态过流检测后, 须进一步在不同类型扰动源中识别出早期故障引起的电缆过流。

本文利用多尺度小波变换提取电缆电流信号的特征量, 以电流的高频细节系数、低频近似系数和模极大值组成复合判据, 检测电缆过流的暂态过程; 构建由不同扰动源引起的电缆过电流的时频特征向量, 利用灰色关联分析得到测量故障电流与标准电缆过电流参考样本的关联度, 以从不同扰动源引起的过电流中识别出由电缆早期故障引起的过电流。

1 不同扰动源引起的电缆过电流特性分析

1.1 不同类型故障引起的电缆过电流

电力系统中短路故障、变压器及电容投切和电动机起动等原因, 会使流过电缆线路的电流出现具有不同波形、幅值及持续时间特征的上升, 对电缆绝缘构成威胁^[12]。而电缆绝缘电阻值的下降, 将使其发生成为不可恢复的永久性故障。在电缆永久性故障之前, 会先有瞬时暂态故障现象的发生, 这种类型的故障时间短、又可恢复, 不影响电力系统正常运行。但是, 经过多次瞬时暂态故障的发生, 会加剧电缆绝缘的受损, 进而发生永久性故障。

由于相间、相间接地故障多由单相接地故障发展而来, 因而电缆早期故障即为可自动恢复的单相接地故障^[11]。电缆早期故障是其绝缘损伤而引起的

一种间歇性的电弧故障, 常用接地故障电弧电阻模型有 Mayr 电弧模型、Cassie 电弧模型和基于介质击穿的分段电弧电阻模型^[13]。考虑到电缆早期故障为弱电流的高阻接地故障, 采用适用于高阻弧光接地的分段电弧电阻为

$$R = \begin{cases} 1/g_1 & |u| < u_1 \\ 1/(2k_1|u| + k_2) & u_1 \leq |u| \leq u_2 \\ 1/g_2 & |u| > u_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: g_1 、 g_2 和 u_1 、 u_2 为电导和电压整定常数, 根据电弧电阻分段区域和阻值确定; k_1 和 k_2 为电弧电阻非线性区域的系数。图 1 为 IEEE 13 节点算例^[14]

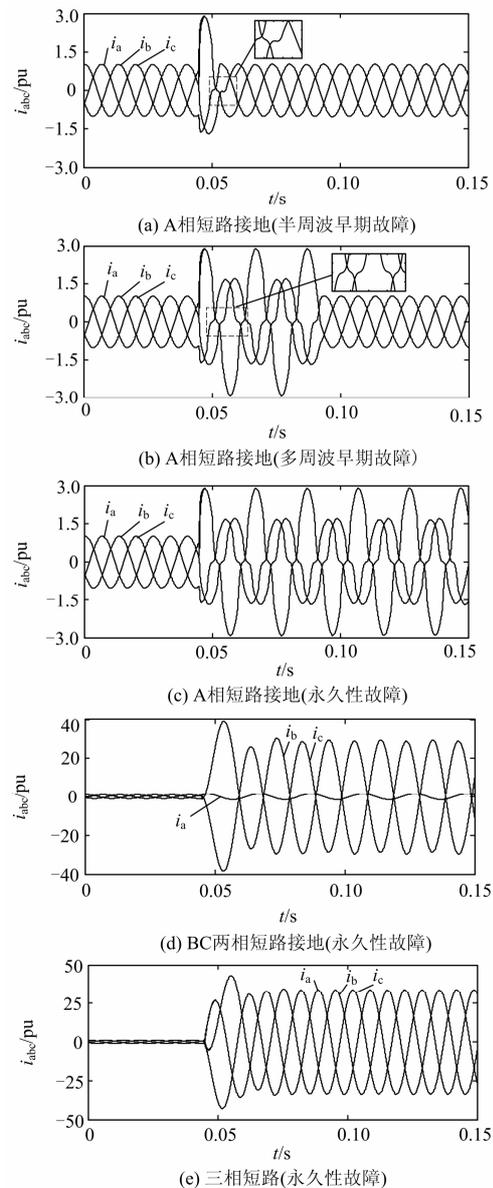


图 1 不同类型短路故障的电缆三相电流

Fig. 1 Three-phase current of feeder cable under different types of short circuit fault

中主干线的 1 km 处(全长 1.5 km)发生不同类型短路故障时的电缆电流, 图 1(a)~图 1(c)的单相短路接地故障均经电弧电阻接地(电弧参数见文献[13]), 其中前两者分别对应可恢复的半波和多周波早期故障。

由于电缆故障电流过零点附近的电弧电阻增大, 使得该故障电流在过零点前后出现“零休”的现象。图 1(a)的半波早期故障通常发生在电压峰值处由电弧引起, 约持续半个周波, 电流过零时自动消失, 而图 1(b)中多周波早期故障通常持续一到四个周期。与两相、三相短路相比, 单相接地短路的电流上升幅度减小, 当其故障持续时间超过五个周波后, 即认为该短路故障不可自动恢复。不同短路故障类型将使电缆电流呈现不同的上升幅度和持续时间, 通过三相电流特征量的提取, 可从不同类型故障中区分具有自动恢复特性的电缆早期故障。

1.2 电容投切和变压器合闸引起的电缆过电流

当 IEEE 13 节点配电网中, 主干线末端节点投入低压电容器组时流过电缆线路的电流, 如图 2(a)所示。图中在 $t=0.045$ s 电容器投入时出现显著的高频暂态电流分量, 同时由于电容器组配置以无功就地平衡为原则, 电容投入后的电缆电流幅值仅出现小幅减小。此时, 暂态电流峰值可达 6 pu, 稳态电流变化在 0.2~0.4 pu 之间^[15], 而当 $t=0.105$ s 电容器切除时电缆电流的暂态分量明显减小。电容投入后构成振荡回路, 从而导致暂态振荡出现, 以 A 相电流为例, 设 RLC 振荡回路方程为

$$Ri_a(t) + L \frac{d}{dt}i_a(t) + \frac{1}{C} \int i_a(t) dt = u_a(t) \quad (2)$$

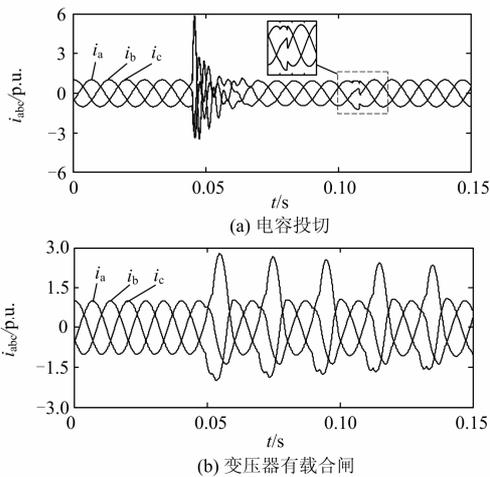


图 2 电容投切和变压器合闸的电缆三相电流

Fig. 2 Three-phase current of feeder cable by transformer and capacitor switching

式(2)中: $u_a(t)$ 和 $i_a(t)$ 为 a 相电压和电流; R 、 L 和 C 为振荡回路参数。电容投入后电缆电流包含由输入

电压和电路参数决定的稳态分量、由电路参数和合闸初始条件决定的暂态分量, 设合闸时 A 相电压初始相位为 θ_0 , 即 $u_a(t)=U_m \cos(\omega t + \theta_0)$, ω 为电网额定角频率, U_m 为相电压幅值, 则电容投入时的电缆电流为

$$i_a(t) = \frac{U_m}{Z_c} \cos(\omega t + \theta_0 - \varphi_c) - \frac{U_m \omega_d}{Z\omega} \sqrt{\sin^2 \theta_0 + \left[\frac{\omega}{\omega_d} \cos \theta_0 \right]^2} \cos(\omega_d t + \delta) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

式中: 振荡角频率 $\omega_d = [1/LC - (R/2L)^2]^{1/2}$; $Z_c = [R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]^{1/2}$; $\varphi_c = \arctan[(\omega L - 1/\omega C)/R]$; $\delta = \arctan(\omega_d/\omega)$; $\tau = 2L/R$ 。振荡角频率大于电网频率, 这使得 $\theta_0=0$ 电容投入时的电流峰值(在 2 pu 左右)小于 $\theta_0=\pi/2$ 的情况(在 6~8 pu 之间)。图 2(a)中电流测量点位于投入电容器的上游, 在电容投入瞬间各相电流的变化极性, 与对应相电压变化极性相反。电容投入瞬间 A 相电流上升, 而 A 相电压瞬间减小后, 逐渐上升至稳态值。不同位置的电容投切都会呈现独特的暂态电流特性, 由此可将其与电缆早期故障进行区分。

图 2(b)为主干线末端节点的配电变压器有载合闸时的电缆电流, 随配电变压器容量的增大, 由铁芯饱和引起的励磁涌流, 对电缆影响不容忽视。设变压器合闸瞬间的 A 相剩磁为 Φ_r , 铁芯的饱和磁通为 Φ_s , 则变压器合闸时的电缆电流为

$$i_a(t) = \begin{cases} \frac{U_m}{Z_l} \cos(\omega t + \theta_0 - \varphi_l) & \text{mod}(t, T) < t_1, \text{mod}(t, T) > T - t_1 \\ \frac{U_m}{Z_l} \left[\cos \theta_0 - \cos(\omega t + \theta_0 - \varphi_l) + \frac{\Phi_r - \Phi_s}{\Phi_m} + \cos(\omega t - \varphi_l) \right] & t_1 \leq \text{mod}(t, T) \leq T - t_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Phi_m = U_m/\omega$; $T = 2\pi/\omega$; Z_l 和 φ_l 为合闸回路的负载阻抗和相角; $t_1 = \theta_1/\omega$ 为励磁涌流间断角 θ_1 对应的时刻^[16]。变压器励磁涌流具有间断特性, 其与电压初始相位、铁芯饱和程度有关, 式(4)中 $\theta_0=0$ 时励磁涌流峰值达到最大, 合闸时三相电压的初始相角不同, 使得各相励磁涌流出现差异。相较于变压器空载合闸, 图 2(b)的有载合闸电流对电缆的危害更严重, 此时电缆电流峰值最大可达 2.8 pu, 其由励磁涌流和负荷电流两部分共同组成。

1.3 负荷投切和电动机启动引起的电缆过电流

当用电设备增多时, 短时的最大负荷可能导致电缆电流超过允许的使用容量。而电力系统中的负荷包括静态负荷和动态负荷, 前者采用恒阻抗、恒电流和恒功率组成的静态负荷模型, 后者则采用感

应电动机模型。图 3(a)显示正常运行时电缆电流接近额定电流,在 $t=0.045\text{ s}$ 和 $t=0.105\text{ s}$ 时分别投入和切除静态负荷的电缆电流。通常情况下静态和动态负荷投切引起的电缆过流稳态值,不会超过其额定负载电流的 1.25 pu。但电动机(动态负荷)启动时的短路电流突增,可达其额定电流的 5~6 pu,如图 3(b)所示。根据感应电动机的等值电路,可得其定子电流峰值与转速和端电压的关系为

$$I_m = \frac{U_m}{\left[R_s + \frac{R_s/s X_m^2}{(R_s/s)^2 + X_r^2} \right]^2 + \left[X_{ls} + X_m \frac{(R_s/s)^2 + X_r X_r}{(R_s/s)^2 + X_r^2} \right]^2} \quad (5)$$

式中: I_m 为定子电流峰值; R_s 、 X_{ls} 为定子电阻和漏抗; R_r 、 X_r 为转子电阻和漏抗; X_m 为励磁电抗, s 为转差; $X_r = X_{lr} + X_m$ 。电动机启动中转差不断增加,当达到临界转差^[17]时电动机启动电流峰值达到最大。图 3(b)中在电动机启动后的 1~2 个周波内各相电流均上升至最大值,电动机启动引起的电缆电流上升持续时间较长(约为几秒至几十秒),这主要由发电机惯性时间常数决定。

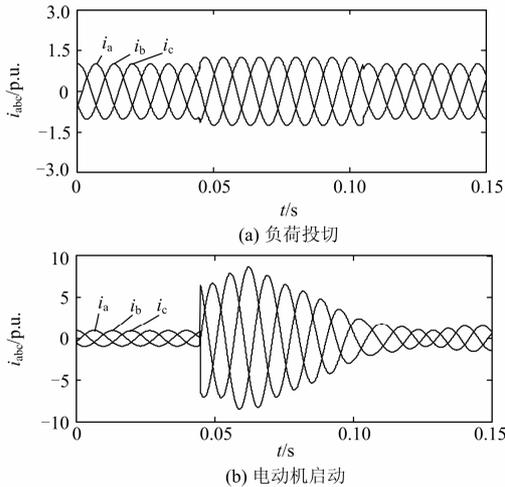


图 3 负荷投切和电动机启动的电缆三相电流
Fig. 3 Three-phase current of feeder cable by load switching and motor starting

不同类型扰动源引起的电缆电流突增,其三相电流上升的幅度、持续时间和高低频电流分量等具有不同的特征。由于早期故障电流小、持续时间短,不会导致继电器动作,需进一步提取电缆电流信号的特征量,从而有效鉴别可自动恢复的半周波和多周波两种电缆早期故障。电缆早期故障检测算法包括电流暂态过程检测和早期故障识别两部分,先由多尺度小波变换得到不同频段的电流特征,利用复合判据确定电缆过电流的暂态过程是否发生;再计

算扰动电流的时频特征向量,通过灰色关联分析得到样本向量与半周波、多周波单相接地短路参考向量的关联度,由此对电缆早期故障进行识别。

2 电缆过流暂态过程的多尺度小波判据

2.1 小波变换的特征量提取

将电缆电流采样信号经离散小波变换分解成细节系数 $d_{j,n}$ 和逼近系数 $c_{j,n}$ 可表示为

$$\begin{cases} d_{j,n} = \sum_i g(i-2n)c_{j-1,i} \\ c_{j,n} = \sum_i h(i-2n)c_{j-1,i} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $g(n)$ 和 $h(n)$ 为高通和低通滤波器; $i=1, 2, \dots, I$ 表示当前窗口中采样点的序号, I 为窗口的采样点数; $j=1, 2, \dots, J$ 为信号的小波系数层数, J 为最大小波分解层数; $n=1, 2, \dots, N$ 为小波函数的离散化程度。电缆早期故障检测装置安装于开关柜中,电流采样频率为 3.2 kHz,每个周波 64 个采样点。图 4 为电缆电流的 3 层小波多尺度分解流程,每层系数所对应的频率范围如表 1 所示。

表 1 各层系数对应的频率范围

各尺度系数	d_1	d_2	d_3	c_3
频率范围/kHz	0.8~1.6	0.4~0.8	0.2~0.4	0~0.2

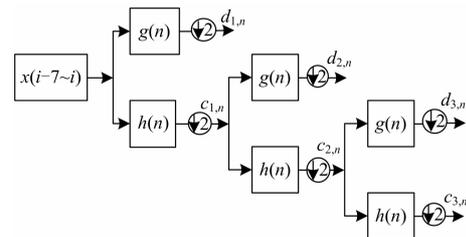


图 4 多尺度离散小波分解流程

Fig. 4 Flow chart of discrete wavelet decomposition

电缆电流信号分解到不同频段上的小波特征量,可作为检测电流暂态过程的依据。其中第 j 层细节系数在其频段范围内的能量 $E_{d,j}$ 为

$$E_{d,j} = \sum_{n=1}^N d_{j,n}^2 \quad (7)$$

第 j 层逼近系数的均方根值 $R_{c,j}$ 为

$$R_{c,j} = \sqrt{\sum_{n=1}^N c_{j,n}^2} \quad (8)$$

对电缆电流信号进行多尺度小波分解后,小波系数模极大值点对应于电流信号突变点,由此可检测电缆暂态过流的突变时刻^[18-19]。选择小波函数为

平滑函数的一阶导数, 则小波变换模极大值就是采样信号与小波函数卷积的极大值。

$$M_{d,j} = \max(|d_{j,n}|) \quad (9)$$

当以平滑函数的二阶导数作为小波函数时, 小波系数的过零点, 与小波函数为一阶导数时的模极大值点相同。小波模极大值点与电流信号突变点相互对应, 变化极性由暂态电流突变方向决定, 大小则与暂态电流的突变幅值有关。

2.2 电缆过流暂态过程的检测判据及流程

由上节可知, 电缆早期故障为自恢复的半周波和多周波单相接地故障, 在持续时间为 0.5~5 个周波内故障自动清除。因此, 电缆过流暂态过程的检测, 先判断第 1 次暂态电流上升的发生, 再判断之后的 0.5~5 个周波内是否发生了第 2 次暂态电流变化。利用前述的细节系数能量值、逼近系数均方根值、小波变换模极大值, 可形成检测电缆电流暂态过程的复合判据。对两次电流突变都采用如下 3 个检测判据, 但第 2 次暂态为恢复性变化, 需要减小其判据阈值, 以确保暂态突变的可靠检测。

1) 判据 1: 若相邻两个窗口高频细节系数能量值之和满足式(10), 则电缆电流暂态突变发生。

$$\eta_{E_d} = \frac{E_d(l) - \overline{E_d(1 \sim l-1)}}{\sigma[E_d(1 \sim l-1)]} > \eta_{E_T} \quad (10)$$

式中: l 表示当前采样窗口序号; $E_d(l)$ 为当前窗口各高频细节系数能量值之和。

$$E_d(l) = \sum_{j=1}^J E_{d,j} = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N d_{j,n}^2 \quad (11)$$

此外, $\overline{E_d(1 \sim l-1)}$ 和 $\sigma[E_d(1 \sim l-1)]$ 为第 1~ $l-1$ 个历史窗口的细节系数能量值之和的均值和标准差, η_{E_T} 为电流突变的判据 1 阈值。

2) 判据 2: 若第 J 层低频逼近系数均方根值的故障分量满足式(12), 则电缆电流暂态突变发生。

$$\eta_{R_c} = \left| \frac{R_c(l) - R_c(l-64)}{R_c(l-64)} \right| > \eta_{R_T} \quad (12)$$

式中: $R_c(l) - R_c(l-64)$ 为当前窗口的第 J 层逼近系数均方根值与上一周波对应窗口的均方根值之差, 即为第 J 层逼近系数的故障分量; η_{R_T} 为电流突变的判据 2 阈值。

3) 判据 3: 若一阶导的小波系数存在极大值且对应时刻的二阶导的小波系数存在过零点, 则表示电流信号存在小波变换模极大值。此时, 相邻窗口模极大值满足式(13), 则电缆电流暂态突变发生。

$$\eta_{M_d} = \frac{M_d(l) - \overline{M_d(1 \sim l-1)}}{\sigma[M_d(1 \sim l-1)]} > \eta_{M_T} \quad (13)$$

式中: $M_d(l)$ 为当前窗口各层模极大值的最大值; η_{M_T} 为电流突变的判据 3 阈值。

当电缆的任意一相电流信号满足式(10)~式(13)中的任一判据, 则表明电缆电流发生了一次暂态扰动突变, 其检测流程如图 5 所示。将窗口依次递推, 若第 1 次电流突变的判别条件满足, 则记当前窗口时刻 t_1 ; 然后, 在 t_1 之后的 0.5~5 个周波内, 判断电流的第 2 次突变是否发生, 判据与第 1 次判别相同, 但是阈值有所减小, 同样记第 2 次电流突变的发生时刻 t_2 。其中阈值设定的原则为尽量减少误判和漏报, 可利用大量仿真和现场测试得到的样本数据测试来设定阈值。当检测到时间间隔小于 0.5~5 周波的两次电流突变后, 将 $t_1 \sim t_2$ 时段内的电缆三相电流记录, 用于电缆早期故障识别。

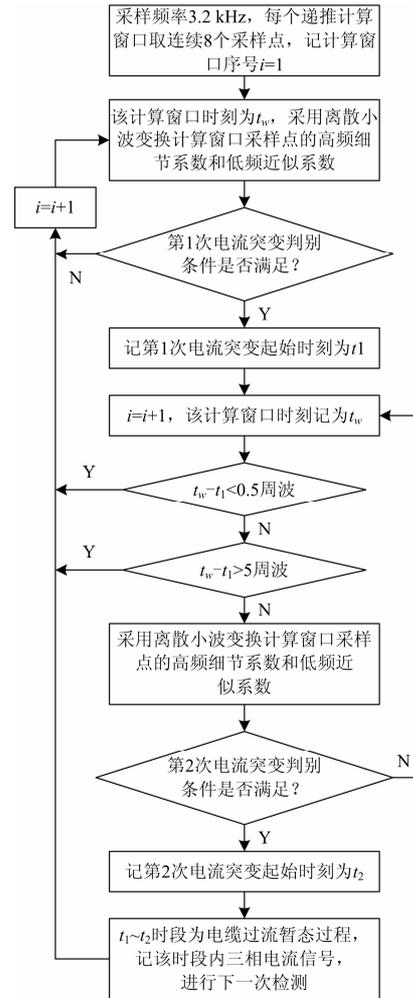


图 5 电缆暂态过流检测流程

Fig. 5 Flow chart of cable transient over-current detection

3 电缆早期故障的时频特征及识别方法

3.1 电缆早期故障的时频特征向量

由于电容器投切、变压器合闸以及电动机启动

都可能引起短时相电流过流,而采用多尺度小波复合判据只能检测到电缆各相电流是否发生过流,还需进一步从众多引起电缆过流的扰动源中区分出由电缆早期故障引起的过电流。电缆过流信号主要为非平稳信号,为充分利用电流信号时域和频域特性,选择3层小波变换的高频细节系数能量值和模极大值(过流扰动相之和) $E_{d,1}, E_{d,2}, E_{d,3}$ 和 $M_{d,1}, M_{d,2}, M_{d,3}$ 、第3层低频近似系数均方根值 $R_{c,3}$ 、各相电流有效值和暂态过程持续时间 I_a, I_b, I_c 和 T_a, T_b, T_c ,构成电缆早期故障识别的时频特征向量,如式(14)。

$$\mathbf{X} = [E_{d,1}, E_{d,2}, E_{d,3}, M_{d,1}, M_{d,2}, M_{d,3}, R_{c,3}, I_a, I_b, I_c, T_a, T_b, T_c] \quad (14)$$

当某相电流未检测到暂态扰动时,对应的暂态过程持续时间取为10个周波,以便与早期故障电流0.5~5周波的持续时间相互区别。利用仿真分析和现场测试可获取不同类型电缆过流信号的时频特征标准向量,再由灰色关联分析法^[20]量化实测的时频特征样板向量与标准向量的差异信息,计算其与不同标准向量的灰色关联度,从整体和动态上定量分析样本数据之间的关联程度。

3.2 电缆早期故障的时频特征关联识别

利用电流过流暂态过程 $t_1 \sim t_2$ 时段内的三相电流数据,按式(14)时频特征向量的指标顺序计算实测样本 \mathbf{X} 。同时,事先根据历史数据形成电缆发生早期故障的6个参考样本(半波和多周波单相接地故障)、其他短路故障10个参考样本(永久性单相、两相、两相接地和三相短路),以及电容器投切、变压器合闸、负荷投切、电动机起动各1个参考样本,形成由20个参考样本构成的矩阵 \mathbf{X}' 为

$$\mathbf{X} = [x(1) \quad x(2) \quad \cdots \quad x(S)]$$

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \mathbf{X}'_1 \\ \mathbf{X}'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}'_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1(1) & x'_1(2) & \cdots & x'_1(S) \\ x'_2(1) & x'_2(2) & \cdots & x'_2(S) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_{20}(1) & x'_{20}(2) & \cdots & x'_{20}(S) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, S 为指标的个数。采用熵权法来客观表征时频特征向量中各项指标对电缆过流分类结果的有效信息量,将含不同指标量纲的参考样本矩阵 \mathbf{X}' 进行归一化处理^[21],则第 s 个评价指标的熵值为

$$H(s) = \frac{-1}{\ln Y} \sum_{y=1}^Y \frac{x'_y(s)}{\sum_{y=1}^Y x'_y(s)} \ln \frac{x'_y(s)}{\sum_{y=1}^Y x'_y(s)} \quad (16)$$

式中, y 和 $Y=20$ 为参考样本的序号和个数。再计算各个指标的熵权为

$$\omega(s) = \frac{1-H(s)}{S - \sum_{s=1}^S H(s)}, \text{ 且有 } \sum_{s=1}^S \omega(s) = 1 \quad (17)$$

可见当指标熵值 $H_s=1$ 时,其熵权为0,则该指标对电缆过流分类无效;指标熵值越小,相应的熵权越大,提供的有效信息越多。利用熵权值对电缆电流时频特征向量的各个指标进行赋权调整,可得到更准确的分类结果。利用灰色关联分析法计算实测样本 \mathbf{X} 与各参考样本 \mathbf{X}' 的关联度,其中 \mathbf{X} 与 \mathbf{X}' 第 s 个指标的关联系数为

$$\xi_y(s) = \frac{\min_{\substack{1 \leq s \leq S \\ 1 \leq y \leq Y}} |x(s) - x'_y(s)| + \rho \max_{\substack{1 \leq s \leq S \\ 1 \leq y \leq Y}} |x(s) - x'_y(s)|}{|x(s) - x'_y(s)| + \rho \max_{\substack{1 \leq s \leq S \\ 1 \leq y \leq Y}} |x(s) - x'_y(s)|} \quad (18)$$

式中, ρ 为分辨系数,选取合适的分辨率可提高关联分析的抗干扰能力(一般取 $\rho=0.5$)。再由关联系数矩阵结合各指标的熵权值向量,得到实测样本 \mathbf{X} 与参考样本 \mathbf{X}' 的关联度 γ_y 为

$$\gamma_y = \sum_{s=1}^S \omega(s) \xi_y(s) \quad (19)$$

由于权重系数 $\omega(s)$ 之和为1和关联系数 $\xi_y(s)$ 取值范围在 $[0, 1]$ 之间,因而实测样本 \mathbf{X} 与各参考样本 \mathbf{X}' 的关联度 γ_y 的范围也为 $[0, 1]$ 。当 $\gamma_y=0$ 时,表明 \mathbf{X} 与 \mathbf{X}'_y 完全不相干;当 $\gamma_y=1$ 时,表明 \mathbf{X} 与 \mathbf{X}'_y 相同; γ_y 越大则 \mathbf{X} 与 \mathbf{X}'_y 的相关程度越大。从参考样本的关联度中找出 γ_y 最大的一项,若该项对应的样本类型属于早期故障则判断该次过电流暂态过程由电缆早期故障引起,由此实现电缆早期故障的识别。

4 仿真分析

利用PSCAD/EMTDC搭建IEEE 13节点配电网算例模型,将该算例的主干线改为电缆线路,采用考虑频率特性的JMarti电缆模型,线路参数和网络结构见文献[14]。通过改变电缆故障点距离、单相接地电弧电阻参数和其他扰动源位置,得到不同扰动下电缆过电流样本数据共750组。其中480组样本用于算法正确性的测试,其余270组用于设定电缆过流检测判据的阈值,以及早期故障识别的参考样本,得到3个小波复合判据阈值如表2所示。

表2 电缆暂态过流检测阈值

Table 2 Detection threshold of cable transient over-current

序号	判据1 (η_{ET})	判据2 (η_{RT})	判据3 (η_{MT})
第1次暂态	1.25	2	1.8
第2次暂态	1.1	1.6	1.3

图6和图7显示了半周波和多周波A相短路接地早期故障的3个小波判据的计算结果。由图可知,对于半周波A相短路接地早期故障的检测,3个小波判据都能在短路起始时刻检测到第1次突变的发生,但由于短路持续时间较短,判据1和判据2都未能检测到其第2次突变的发生,只有运用模极大值的判据3能准确检测到第2次突变。图7描述了一个持续时间为2.5个周波的A相短路接地早期故障,可见3个小波判据均能在短路起止时刻检测到两次突变的发生。

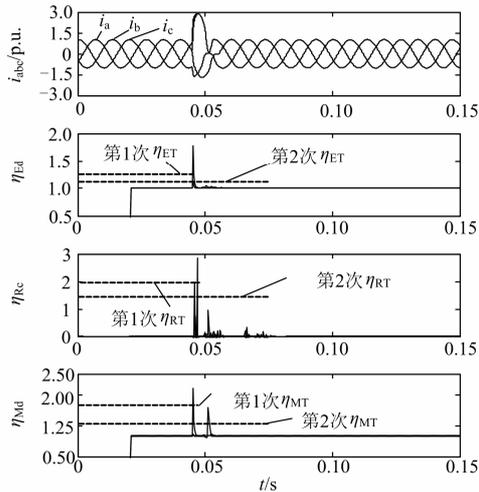


图6 半周波早期故障电流检测结果

Fig. 6 Detection results of half-cycle incipient fault

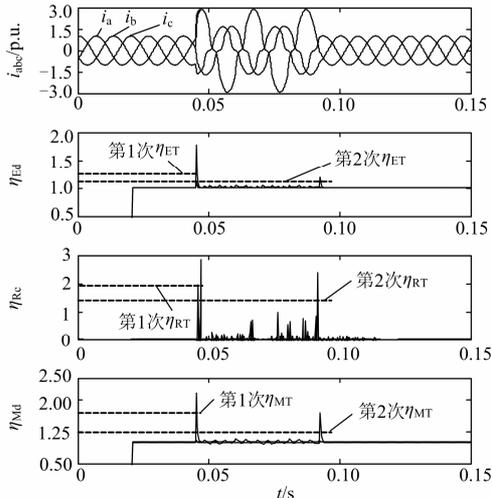


图7 多周波早期故障电流检测结果

Fig. 7 Detection results of multi-cycle incipient fault

以图7的多周波早期故障为例,其短路故障发生时刻为 $t_1=0.045$ s和结束时刻 $t_2=0.092$ s,当电缆电流测量信号加入不同噪声时,利用多尺度小波复合判据得到的故障起止时间,如表3所示。噪声信号对电缆早期故障起止时间检测影响很小,当信噪

比为60 dB时,故障起止时间与无噪声时相同,而在40 dB和20 dB时故障持续时间误差较大,但仍小于2 ms在可接受范围内,因此,本文方法能够有效实现电缆早期故障起止时间的检测。

采用本文所提基于小波变换方案对480组参考样本在不同噪声水平下进行暂态过电流检测,通过与仿真对比,统计不同故障条件和不同噪声水平下的暂态过电流检测和识别正确率,如表4所示。本文方法对于各种短路故障、变压器有载及空载合闸、电容器投切和电动机起动在不同信噪比下暂态过电流识别都有较高正确率(91.1%~100%),且信噪比越大正确率越高。由于变压器空载合闸时高频、低频特征量差异更加明显,对应的识别正确率略高于有载合闸的情况;对负荷投切引起的暂态过电流识别的正确率相对较低仅50%~70%(由于常规负荷过电流的扰动程度较小)。但是,本文方法仍能够准确实现对电缆半周波单相短路及多周波单相短路早期故障暂态过电流的识别。

表3 多周波早期故障起止时刻检测结果

Table 3 Detection results of starting and ending times of multi-cycle incipient fault

信号类型		t_{1a}/s	t_{2a}/s	$T_a=(t_{2a}-t_{1a})/s$
无噪声	检测结果	0.045 3	0.092 5	0.047 2
	绝对误差	0.000 3	0.000 5	0.000 2
信噪比 60 dB	检测结果	0.045 3	0.092 5	0.047 2
	绝对误差	0.000 3	0.000 5	0.000 2
信噪比 40 dB	检测结果	0.045 3	0.093 2	0.047 9
	绝对误差	0.000 3	0.001 2	0.000 9
信噪比 20 dB	检测结果	0.045 3	0.093 9	0.048 6
	绝对误差	0.000 3	0.001 9	0.001 6

表4 电缆暂态过流检测和识别结果

Table 4 Detection and classification results of cable transient over-currents

类型	次数	检测识别次数/正确率			
		无噪声	60 dB	40 dB	20 dB
半周波短路	90	89/98.9%	88/97.8%	85/94.4%	82/91.1%
多周波短路	120	120/100%	119/99.2%	118/98.3%	118/98.3%
其他短路	100	100/100%	98/98%	98/98%	98/98%
变压器 有载合闸	30	28/93.3%	28/93.3%	28/93.3%	28/93.3%
变压器 空载合闸	35	34/97.1%	34/97.1%	34/97.1%	34/97.1%
电容投切	50	49/98%	49/98%	49/98%	48/96%
电动机起动	25	24/96%	24/96%	23/92%	23/92%
负荷投切	30	21/70%	18/60%	16/53.3%	15/50%

表5 为以图6和图7为例的半周波和多周波短

路过电流各指标的熵权值和灰色关联分析结果(仅选取了 20 个参考样本中相关度相对较高的 5 个样本)。对于 A 相半周波短路过电流, 其与 A 相半周波过电流参考样本绝大多数指标的相关性较大, 从而具有最高的关联度, 但与 B 相半波短路的 I_c 、 T_c , C 相半波短路的 I_b 、 T_b 、AB 相短路的 I_a 以及电容投

切的 E_{d1} 、 E_{d2} 这几个指标也有相对较高的相关度; 对于 A 相多周波过电流, 其指标特征向量与 A 相多周波短路过电流参考样本的所有指标都有很大的相关性。所提基于灰色关联分析的电缆早期故障识别方法能够准确地识别出由半周波单相短路和多周波单相短路引起的电缆早期故障过电流。

表 5 半周波和多周波早期故障熵权和关联分析结果

Table 5 Entropy weights and relation analysis results of half-cycle and multi-cycle incipient fault

指标	E_{d1}	E_{d2}	E_{d3}	M_{d1}	M_{d2}	M_{d3}	R_{c3}	I_a	I_b	I_c	T_a	T_b	T_c	关联度	
熵权值 ω/s	0.087	0.075	0.036	0.072	0.054	0.026	0.043	0.092	0.087	0.075	0.122	0.113	0.118		
半周波	A 相半周波 ξ_1/s	0.834	0.769	0.472	0.951	0.947	0.788	0.352	0.983	0.956	0.942	0.937	0.938	0.951	0.879
	B 相半周波 ξ_2/s	0.077	0.054	0.048	0.013	0.062	0.097	0.089	0.002	0.369	0.879	0.022	0.021	0.902	0.233
	C 相半周波 ξ_3/s	0.067	0.053	0.046	0.009	0.063	0.083	0.075	0.002	0.906	0.346	0.022	0.913	0.023	0.234
	AB 短路接地 ξ_{15}/s	0.018	0.029	0.028	0.012	0.019	0.017	0.023	0.632	0.014	0.012	0.001	0.002	0.002	0.069
	电容投切 ξ_{17}/s	0.512	0.531	0.299	0.268	0.162	0.121	0.002	0.015	0.021	0.025	0.005	0.004	0.007	0.133
多周波	A 相多周波 ξ_4/s	0.863	0.871	0.562	0.957	0.986	0.904	0.531	0.995	0.962	0.989	0.975	0.966	0.978	0.922
	B 相多周波 ξ_5/s	0.113	0.167	0.131	0.059	0.033	0.041	0.062	0.001	0.313	0.969	0.099	0.052	0.971	0.269
	C 相多周波 ξ_6/s	0.156	0.161	0.217	0.067	0.031	0.031	0.074	0.002	0.978	0.252	0.091	0.941	0.063	0.273
	AB 短路接地 ξ_{15}/s	0.025	0.038	0.027	0.518	0.217	0.153	0.032	0.573	0.033	0.035	0.002	0.002	0.002	0.119
	电容投切 ξ_{17}/s	0.478	0.561	0.352	0.323	0.255	0.286	0.005	0.032	0.028	0.027	0.008	0.007	0.008	0.151

5 结论

本文利用多尺度小波变换提取电缆早期故障电流的特征量, 形成检测电缆过流的暂态过程的三个复合判据; 再由灰色关联分析计算测量故障电流与标准电缆早期故障电流的关联度, 以识别电缆早期故障。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 对于电缆半周波单相短路故障, 仅运用模极大值的判据能准确检测到第二次突变; 而对于多周波故障, 三个判据均有效, 利用小波复合判据能够有效检测由不同扰动源引起的电缆过电流。基于灰色关联分析的电缆过流识别方法虽然对常规负荷过电流识别率较低, 但仍能准确识别电缆早期故障引起的过电流。

参考文献

[1] 王雅群, 尹毅, 李旭光, 等. 等温松弛电流用于 10 kV XLPE 电缆寿命评估的方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 33-37, 52.
WANG Yaqun, YIN Yi, LI Xuguang, et al. The method of lifetime evaluation on 10 kV XLPE cables by isothermal relaxation current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 33-37, 52.

[2] 孙仲民, 何正友, 戴铭. 基于灰色预测的电力电缆老化过程预警仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 55-60.
SUN Zhongmin, HE Zhengyou, DAI Ming. Simulation

study on pre-alarm of power cable aging process based on grey prediction[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 55-60.

[3] STRINGER N T, KOJOVIC L A. Prevention of underground cable splice failures[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 230-239.

[4] 戴铭. 10 kV 地下电缆早期故障检测与识别方法探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
DAI Ming. Discussion methods of incipient fault detection and identification in 10 kV underground cables[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[5] XU Z. Fault location and incipient fault detection in distribution cables[D]. Ontario: The University of Western Ontario, 2011.

[6] 高小庆, 姜芸, 罗俊华, 等. XLPE 电力电缆过负荷温升与早期损坏机理的研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 62-64.
GAO Xiaoqing, JIANG Yun, LUO Junhua, et al. The principle of earlier period damage of XLPE power cable due to temperature risen by overload[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(2): 62-64.

[7] 周凯, 李旭涛, 黄华勇, 等. 电缆终端安装刀痕缺陷的局部放电特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 104-110.
ZHOU Kai, LI Xutao, HUANG Huayong, et al. Analysis of partial discharge characteristics for installing cutting

- defects in cable terminations[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(10): 104-110.
- [8] HAMEL A, GAUDREAU A, COTE M. Intermittent arcing fault on underground low-voltage cables[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(4): 1862-1868.
- [9] KASZTENNY B, VOLOH I, JONES C G. Detection of incipient faults in underground medium voltage cables[C] // *Proceedings of 2009 Power Systems Conference*, Clemson, USA, 2009.
- [10] 贾勇, 何正友, 赵静. 基于小波熵和概率神经网络的配电网电压暂降源识别方法[J]. *电网技术*, 2009, 33(16): 63-69.
JIA Yong, HE Zhengyou, ZHAO Jing. A method to identify voltage sag sources in distribution network based on wavelet entropy and probability neural network[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(16): 63-69.
- [11] SIDHU T S, XU Z. Detection of incipient faults in distribution underground cables[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(3): 1363-1371.
- [12] 梁睿, 赵国栋, 王崇林, 等. 配电网线路绝缘状态在线监测研究[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(增刊 2): 331-336.
LIANG Rui, ZHAO Guodong, WANG Chonglin, et al. Study of feeders online insulation monitoring in distribution power network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(S2): 331-336.
- [13] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 基于介质击穿原理的配电网线路高阻接地故障精确建模[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(12): 62-66, 106.
WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. High-impedance fault modeling based on solid dielectric electrical breakdown theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(12): 62-66, 106.
- [14] KERSTING W H. Radial distribution test feeders[C] // *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Columbus, USA, 2001.
- [15] HUR K, SANTOSO S. On two fundamental signatures for determining the relative location of switched capacitor banks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(2): 1105-1112.
- [16] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.
- [17] 汤蕴璆, 史乃. 电机学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2005: 137-139.
- [18] 刘晓明, 赵洋, 曹云东, 等. 基于小波变换的交流系统串联电弧故障诊断[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(1): 10-17.
LIU Xiaoming, ZHAO Yang, CAO Yundong, et al. Series arc fault diagnosis based on wavelet transform in AC system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(1): 10-17.
- [19] 许珉, 杨艳伟, 申克运, 等. 基于小波变换的电缆短距离开路故障测距[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(4): 112-116.
XU Min, YANG Yanwei, SHEN Keyun, et al. Cable short open-circuit fault location based on wavelet transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(4): 112-116.
- [20] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 40-69.
- [21] 吴耀文, 马溪原, 方华亮, 等. 大规模风电特高压专用通道落点优选方法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(1): 9-16.
WU Yaowen, MA Xiyuan, FANG Hualiang, et al. Selection method of optimal access point for large scale wind power transmission UHV corridor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(1): 9-16.

收稿日期: 2014-08-04; 修回日期: 2014-11-26

作者简介:

姚海燕(1978-), 女, 硕士, 从事电力系统科技信息管理工作;

张静(1974-), 女, 硕士, 工程师, 从事高低压设备制造和管理工作;

留毅(1975-), 男, 高级工程师, 从事电气设备制造工作。

(编辑 周金梅)