

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.03.033

## 基于实时小波变换的配网短路故障快速检测技术

刘宏森<sup>1</sup>, 李迎华<sup>1</sup>, 王 恒<sup>2</sup>, 袁 静<sup>2</sup>

(1. 国网铜川供电公司, 陕西 铜川 727000; 2. 西安森宝电气工程有限公司, 西安 710119)

**摘要:** 针对10 kV配网容量不断增加而引起的短路故障电流急剧上升,甚至超过断路器开断电流能力的问题,常规的故障检测算法主要是通过有效值、瞬时值、斜率等特征进行判断,存在误检率较高、检测速度较慢等缺点。文中提出了一种基于实时小波变换的配网短路故障快速检测算法,即每次更新8个电流采样数据,并采用递推算法进行三层小波变换,以三相电流的第3层分解小波系数d3绝对值之和与电流瞬时值作为检测短路故障的综合判据。在MATLAB/Simulink下完成了10 kV配网三相短路故障的仿真,对仿真过程进行了详细的说明。最后对文中算法检测短路故障的时间进行了多次仿真,结果表明采用快速递推法进行实时小波变换可以快速、有效地检测出短路故障,具有良好的适用性。

**关键词:** 电力系统; 短路故障; 故障电流限制器; 小波变换; 快速检测

### Fast Detection Technology of Short-circuit Fault in Distribution Network Based on the Real-time Wavelet Transform

LIU Hongsen<sup>1</sup>, LI Yinghua<sup>1</sup>, WANG Heng<sup>2</sup>, YUAN Jing<sup>2</sup>

(1. State Grid Shaanxi Tongchuan Electric Power Company, Shaanxi Tongchuan 727000, China;  
2. Xi'an Senbao Electrical Engineering Co., Ltd., Xi'an 710119, China)

**Abstract:** As the increasing capacity of 10 kV distribution network caused a rush rise of the short-circuit current, even exceed the max breaking capacity of fault current limiter(FCL). The normal algorithms to detect the short-circuit fault are always by current RMS, transient value or slope, but these methods are imperfect in detection speed or detection accuracy. This paper presents a real-time wavelet transform algorithm to detect fault quickly in distribution network. By updating eight current sampling data each time and using the method of recursion wavelet transform, we combine the sum of the absolute value of the third wavelet coefficients d3 to the current instantaneous value as a comprehensive criterion to detect short circuit faults. The three-phase short-circuit fault simulation are carried out based on MATLAB/Simulink, it presents a detailed explanation of the process. Finally, this paper has conducted thousands of simulations of the time of short-circuit fault detection, and the results proved that the real-time wavelet transform can detect short circuit faults quickly and effectively, it also has good adaptability.

**Key words:** power system; short-circuit fault; fault current limiter(FCL); wavelet transform; quick detection

## 0 引言

电力系统中的故障大多是由短路引起的,可能发生的短路一般分为:三相短路、两相短路、两相接地短路和单相接地短路。电力系统运行经验表明,在各种类型的短路中,单相短路发生的概率最高但危害较小,其次是两相短路,三相短路发生的概率最

小但对电力系统的影响最严重。当配网线路发生短路时,高压断路器迅速断开以保护电力系统安全,目前10 kA配网高压断路器的开断电流一般为20、25、31.5 kA等<sup>[1-3]</sup>。随着电网的迅速发展,城市和工业中心负荷容量的不断增加,造成短路电流水平急剧上升,甚至超过了断路器的开断能力,严重危害了电网的运行安全。一种解决电流超标问题的途径是更换容量更大的断路器,但这种方式投资较大且具有局

限性;另一种方案是在不改变现有电网结构、不更换设备的情况下,采用故障电流限制装置(FCL),系统正常工作时不影响系统潮流,在系统故障时,投入限流装置,将系统短路电流限制在一定范围内<sup>[4]</sup>。FCL的典型应用是与限流电抗器并联,即将限流开关与电抗器并联后串入线路中,这种结构避免了正常工作时在线路中串联固定电抗器的缺点,当故障发生时投入限流电抗器可以分流故障电流,从而减小过大的故障电流对电网的冲击。

目前,故障限流器检测线路故障主要是采用采样电流的有效值、瞬时值以及变化率等方法,但这些方法在故障检测的准确性、快速性等方面都存在一定不足。例如,采用快速傅里叶变换计算电流有效值来判断短路故障时,检测时间至少在10 ms以上,限流器不能及时地限制短路电流的发展,过大的短路电流有可能致使断路器无法正常开断,威胁系统运行安全<sup>[5]</sup>。而采用电流变化率的方法不能有效的排除外界干扰对检测准确性的影响。针对以上问题,本文提出了一种基于实时小波变换的配网短路快速识别方法,它基于小波变换 Mallat 塔式算法<sup>[6-8]</sup>,采用 db4 小波<sup>[9-10]</sup>对系统实时采样电流进行多尺度分解,降低噪声、涌流、冲击性负荷等引起的干扰,利用快速递推法实时计算第3层小波系数,结合电流瞬时值实现配网线路短路故障的快速识别。

## 1 配网短路故障检测原理

在电力系统中,故障信号中的奇异点及不规则的突变部分携带着重要的信息。当配网线路发生短路时,故障信号通常表现为电流信号发生突变,因此快速检测信号突变点对于快速识别短路故障具有重要的意义。

### 1.1 小波变换基本原理

小波变换是一种多尺度的信号分析方法,具有良好的时域局部化特性,适合分析非平稳信号的瞬态及时变特性<sup>[11-13]</sup>。配网发生短路故障时,三相电流是带有奇异点的非线性信号,实时小波变换提取电流信号的奇异点可以快速识别出短路故障。

小波变换检测故障的实质是用小波系数来表征小波函数与原始信号的相似性,小波变换的方法是将原始信号与具有伸缩(尺度变换)平移(平移变换)功能的小波函数进行卷积,见图1。对采样数据的离散小波分解,一般进行下采样,即使用离散信号的二进小波变换进行快速分解,递推公式为

$$S_2'f(n) = \sum_k h(k) S_2^{j-1} f(n - 2^{j-1}k) \quad (1)$$

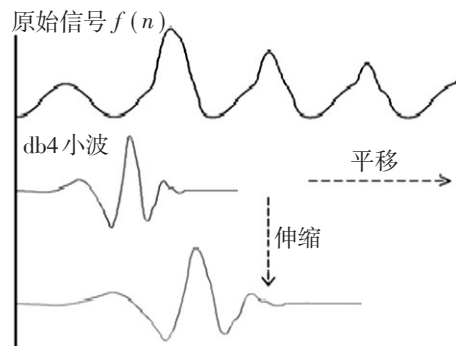


图1 小波变换示意图

Fig. 1 Sketch map of wavelet transform

$$W_2'f(n) = \sum_k g(k) S_2^{j-1} f(n - 2^{j-1}k) \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $S_2'f(n)$ 和 $W_2'f(n)$ 分别为各尺度下的平滑系数和小波系数; $h(k)$ 和 $g(k)$ 为小波分解滤波器组系数<sup>[14]</sup>;k为滤波器有效长度。离散小波变换得到的小波系数 $W_2'f(n)$ 的模值表征了两个信号的相似程度。系统发生短路故障时采样信号发生突变,突变点经小波变换得到的小波系数模值远大于正常时刻的值,因此可作为系统短路的识别标志。此外,采样信号噪声、线路涌流、冲击性负荷等会对小波系数有着较大的影响,通常将信号在不同频域上进行多尺度分解以达到滤除噪声、干扰,准确提取小波系数的目的<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 小波变换递推算法

在实际应用中,传统小波变换通常依据故障录波的全时域采样数据,提取经变换得到时域和频域特征以实现故障识别、定位的作用<sup>[17]</sup>。但在短路故障实时检测系统中,必须在故障发生之后短时间内实现信号的突变检测以限制快速上升的短路电流。为将小波变换应用到实时检测系统中,在传统小波变换的基础上进行改进,提出一种快速递推的实时小波变换算法,用于故障电流限制器以实现配网短路故障的快速识别。

小波变换的函数有很多种,文中选取了 DaubechiesdbN(N=4)小波对原始信号进行多尺度小波变换,dbN是有效支撑长度为2N-1,消失矩阶数为N,且具有正交性的小波函数,即每次小波母函数与信号进行卷积的长度是有限的<sup>[18]</sup>。

由于采样信号不可避免的受到外界干扰,因此对原始信号进行3层小波分解,采用第3层小波系数作为短路故障的判定特征值,以滤除外界噪声对故障判定的影响,第3层小波系数的计算方法如下。

设初始*i*=0,原始采样信号 $X_1, X_2, \dots, X_{50}$ ,经下采

样 db4 低通滤波器  $h(k)$  分解, 得到第一层平滑系数  $A_{1,1}, A_{1,2}, \dots, A_{1,22}$ , 计算公式为

$$\begin{cases} A_{1-(1+i)} = X_{1+2i}h(8) + X_{2+2i}h(7) + \dots + \\ \quad X_{7+2i}h(2) + X_{8+2i}h(1) \\ A_{1-(2+i)} = X_{3+2i}h(8) + X_{4+2i}h(7) + \dots + \\ \quad X_{9+2i}h(2) + X_{10+2i}h(1) \\ \vdots \\ A_{1-(22+i)} = X_{43+2i}h(8) + X_{46+2i}h(7) + \dots + \\ \quad X_{49+2i}h(2) + X_{50+2i}h(1) \end{cases} \quad (3)$$

进行下采样后, 经  $h(k)$  分解, 得到第 2 层平滑系数  $A_{2,1}, A_{2,2}, \dots, A_{2,8}$ , 计算公式为

$$\begin{cases} A_{2-(1+i)} = A_{1-(1+2i)}h(8) + A_{1-(2+2i)}h(7) + \dots + \\ \quad A_{1-(7+2i)}h(2) + A_{1-(8+2i)}h(1) \\ A_{2-(2+i)} = A_{1-(3+2i)}h(8) + A_{1-(4+2i)}h(7) + \dots + \\ \quad A_{1-(9+2i)}h(2) + A_{1-(10+2i)}h(1) \\ \vdots \\ A_{2-(8+i)} = A_{1-(15+2i)}h(8) + A_{1-(16+2i)}h(7) + \dots + \\ \quad A_{1-(21+2i)}h(2) + A_{1-(22+2i)}h(1) \end{cases} \quad (4)$$

进行下采样后, 经 db4 高通滤波器  $g(k)$  分解后得到第 3 层小波系数  $D_{3,1}$ , 计算公式为

$$D_{3-(1+i)} = A_{2-(1+2i)}g(8) + A_{2-(2+2i)}g(7) + \dots + \\ A_{2-(7+2i)}g(2) + A_{2-(8+2i)}g(1) \quad (5)$$

原始信号经过 3 层小波分解可有效滤除噪声等随干扰的影响。根据式(3)-(5)的递推算法, 令  $i=i+1$ , 随着采样值的不断更新, 每更新 8 个采样值, 即可得到一个小波系数  $D_{3,n}$ , 见图 2。例如要计算下一个小波系数  $D_{3,2}$ , 受下采样计算的影响, 需更新第 2 层小波变换的 2 个平滑系数  $A_{2,9}, A_{2,10}$ , 即更新第 1 层小波变换的 4 个平滑系数  $A_{1,23}$  至  $A_{1,26}$ , 即需要更新 8 个原始信号的采样数据  $X_{51} \sim X_{58}$ 。

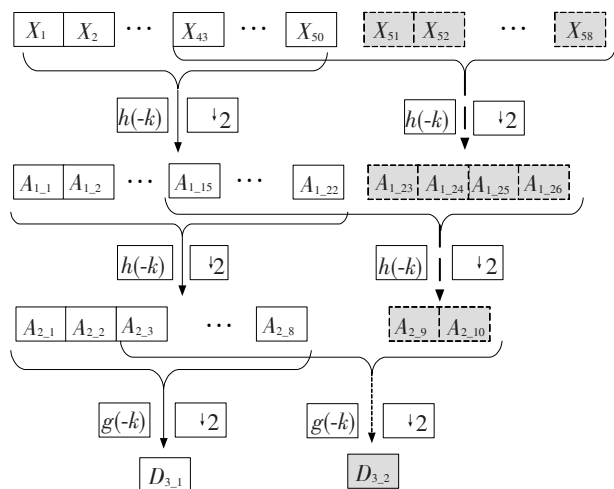


图2 实时小波变换递推算法

Fig. 2 Real-time wavelet transform recursive method

实时小波变换递推算法的快速性体现在, 每更新 8 个采样值即可得到判定故障的特征值, 通过不

断利用新的采样值替换原始信号中旧的采样值, 并与小波函数进行卷积计算, 即可快速判定是否有故障发生。

采用快速递推实时小波变换算法检测 10 kV 配网系统短路故障的流程见图 3。

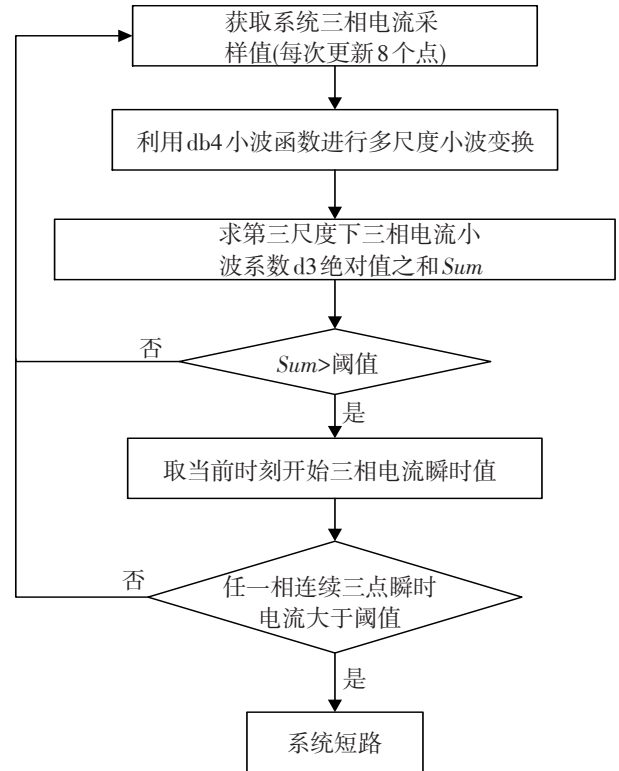


图3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow diagram

具体步骤如下:

1) 获取系统三相电流采样值, 每次每相更新 8 个值。

2) 选择 Daubechies db4 对三相电流采样信号进行 3 层小波分解, 分别得到的三相电流小波系数  $d3-a, d3-b, d3-c$ , 并对三相电流小波系数绝对值求和, 得到故障判定特征值  $Sum$ 。

3) 若特征值  $Sum$  大于设定阈值, 则判定系统满足第一层判据, 跳至步骤 4), 否则, 返回步骤 1)。

4) 连续检测从故障时刻起的三相电流瞬时值, 若任意一相电流瞬时值连续 3 个采样点大于设定阈值, 即判断系统短路, 判定程序结束。否则返回步骤 1), 进行下一轮判定。

## 2 系统仿真建模

在 MATLAB/Simulink 环境下, 利用 SimPower System 工具箱搭建了配网 10 kV 线路仿真模型<sup>[19-20]</sup>, 见图 4。系统电源连接方式为 Y 中性点不接地, 三相线电压为 10.5 kV, 线路全长 15 km, 负

载3 500 kVA,短路故障模块模拟短路故障,三相断路器模拟变压器空载投运,三相断路器1模拟冲击性负荷投入。系统采样频率为6 400 Hz,

即每周期128个采样点,仿真时间设置为1.5 s,三相电流采样数据通过Simout模块输出到工作区。

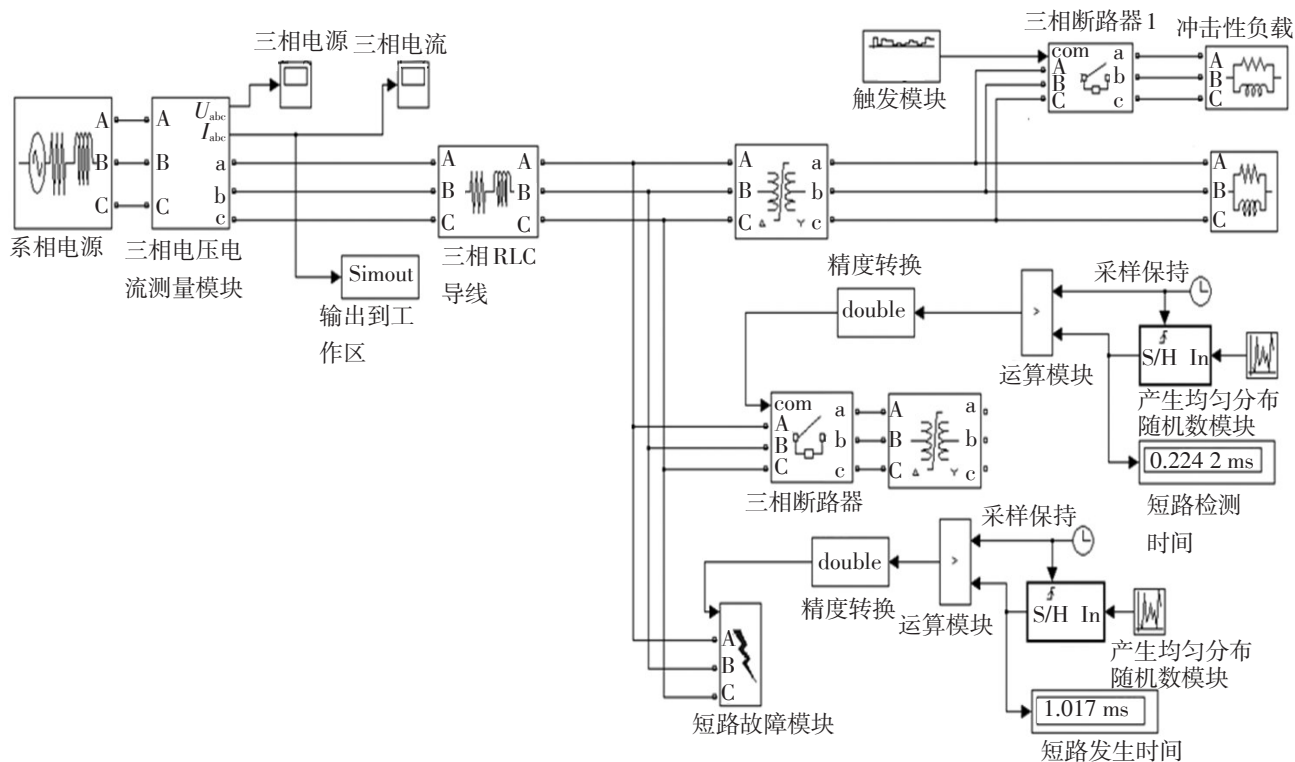


图4 配网10 kV线路仿真模型

Fig. 4 Simulation model of 10 kV distribution network

### 3 算法效果

根据搭建的系统仿真模型分别进行了配网三相短路和相间短路故障仿真,利用.mat文件编写了实时小波递推算法实现短路故障的快速识别。故障判定特征值的阈值设定为400,电流瞬时值阈值设定为10 kA。冲击性负荷投入、空载变压器投入以及三相短路时间分别由计算机CPU时间随机产生,短路故障点距电源距离设置为1 km。考虑实际应用中外界的引起的干扰,在原始采样信号的基础上加入了信噪比为10 db的随机噪声,仿真结果见图5。

系统设置总仿真时间为1.5 s,冲击性负荷投入时刻为0.198 5 s,空载变压器投入时刻为0.236 4 s,三相短路故障时刻为0.522 8 s。图5(c)为B相电流信号经多尺度分解的结果,由图5(c)可以看出由于噪声干扰,故障时刻第1层小波系数d1不能从中分辨出,因此无法作为识别短路故障的判据。而经3层小波分解得到第3层小波系数d3能够明显地识别出系统短路特征。受短路时刻故障电流不同初相角的影响,小波系数有时在特殊故障角下的特征并不突出,由图5(b)可以看出短路时C相电流的小波系数

d3并不明显,但A相和B相特征辨识度较好,因此文中取三相电流小波系数绝对值之和Sum作为短路故障判据更为可靠,且空载变压器投入引起的涌流、冲击性负荷的随机投入对于区分系统短路故障影响不大。

为验证文中算法识别系统短路故障的快速性,本文编写了.mat文件格式的实时小波快速递推算法,并在Simulink平台上进行了1 000次随机故障初相角下的短路故障快速识别仿真实验。设短路故障发生时刻为 $t_1$ ,算法识别出短路故障的时刻为 $t_2$ , $\Delta t=t_2-t_1$ 为算法识别短路故障时间(ms)。实时小波变换故障识别结果见图6。图6中x坐标为试验次数,y坐标为每次试验文中算法识别短路故障所用的时间。由结果可以看出,采用db4小波进行快速递推小波变换,以三相电流第三层小波系数绝对值之和Sum,与采样电流瞬时值共同作为综合判据,均可在1/4个周期(5 ms)以内识别出短路故障,此时短路电流相对较小,不会对系统造成危害。

系统发生短路时,冲击电流的水平主要取决于短路点距电源的电气距离,通常变压器近区的故障冲击电流较大。分别采用文中算法和FFT算法,通

过设定系统不同短路点,分别进行了100次计算,得到的平均检测结果见表1。从表1中可以看出,快速递推实时小波变换算法能够在1/4个周期(5 ms)内检测出短路故障,而FFT平均检测时间大于1/2个周期(10 ms)。

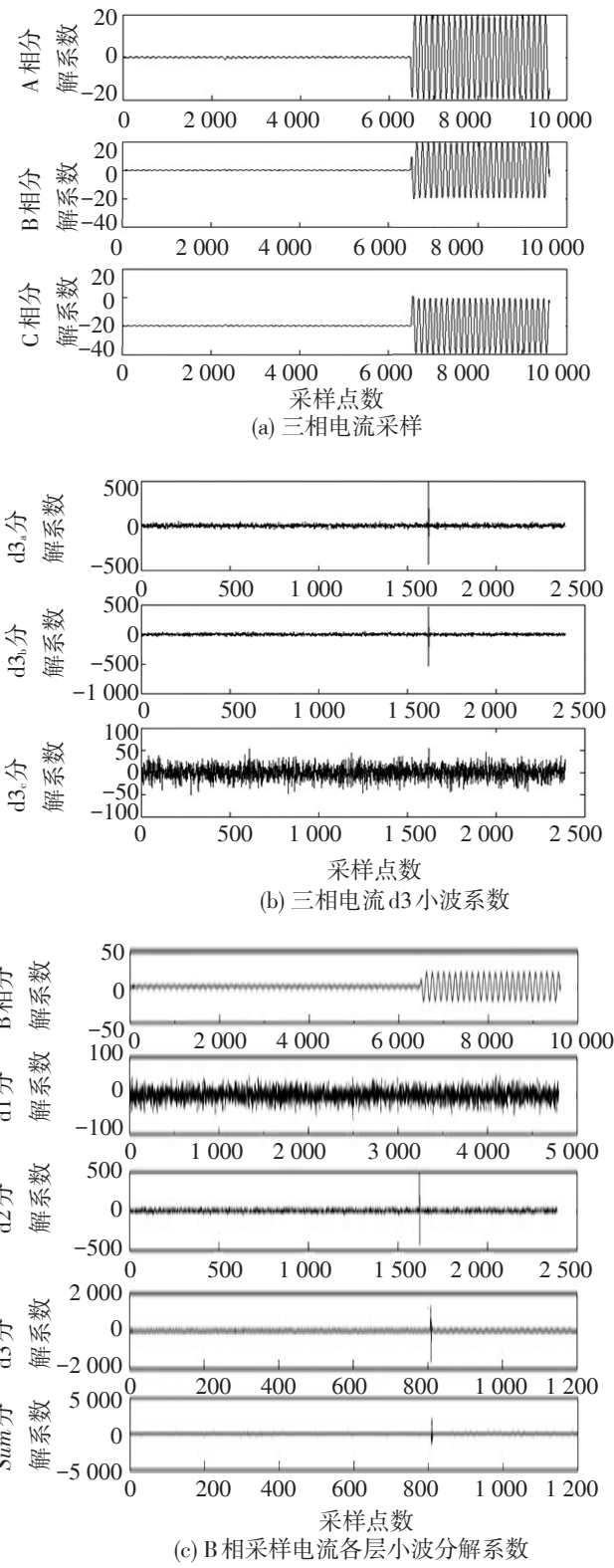


图5 3层小波分解结果

Fig. 5 The result of wavelet decomposition in 3 levels

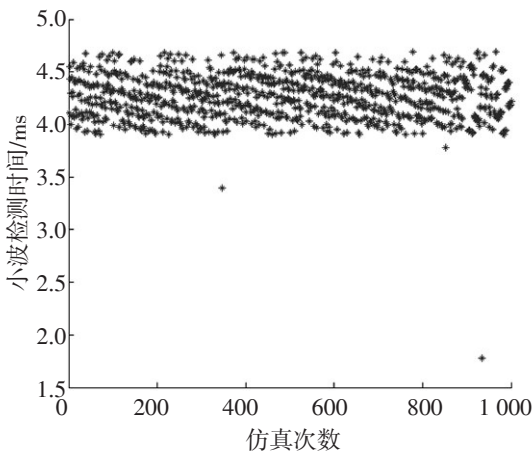


图6 文中算法识别短路故障时间统计

Fig. 6 Detecting time of short-circuit fault by wavelet transform

表1 FFT和实时小波变换算法故障检测时间

Table 1 Fault detect time in FFT and wavelet

| 故障点距电源距离/km | 平均检测时间/ms |       | 短路电流平均值/A |
|-------------|-----------|-------|-----------|
|             | FFT       | 文中算法  |           |
| 1.0         | 11.286    | 2.933 | 13 830    |
| 2.0         | 12.011    | 3.954 | 6 935     |
| 3.5         | 11.489    | 4.283 | 3 953     |
| 5.0         | 10.977    | 3.628 | 2 773     |
| 8.0         | 11.992    | 4.021 | 1 731     |
| 10.0        | 12.305    | 3.906 | 1 387     |

此外,系统正常工作时的电流、变压器短路阻抗、突发短路瞬间电压相位等都对短路电流的发展有着不同程度的影响,因此,短路故障特征值的选取应综合以上因素。

4 结语

针对配网日益剧增的短路电流,常规故障检测算法存在误检率较高、检测速度较慢的问题,提出一种基于实时小波变换的快速递推算算法:通过对系统三相电流进行采样,利用快速递推的方法对采样电流进行多尺度实时小波变换,从中提取出故障特征快速识别系统短路故障。大量的仿真实验结果表明,快速递推实时小波变换算法能够快速、有效的识别配电网短路故障,具有良好的适用性。文中的研究算法为开发具有短路故障快速检测与短路电流快速分断功的限流器奠定了基础。

参考文献:

[1] 张 铭. 短路电流限制器技术综述[J]. 华东电力, 2008,9(36):43-46.  
ZHANG Ming, Review for shortcircuit limiters[J]. East

- China Electric Power, 2008, 9(36): 43-46.
- [2] 李 颀, 缪希仁. 短路故障快速检测与限制技术综述[J]. 电器与能效管理技术, 2014(18): 1-5.
- LI Biao, MIAO Xiren. A review of rapid detection and limiting technology for short circuit fault[J]. Low Voltage Apparatus, 2014(18): 1-5.
- [3] 武守远, 荆 平, 戴朝波, 等. 故障电流限制技术及其新进展[J]. 电网技术, 2008, 33(24): 23-32.
- WU Shouyuan, JING Ping, DAI Chaobo, et al. Fault current limiting measures and their recent progress[J]. Power System Technology, 2008, 33(24): 23-32.
- [4] 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(3): 22-29.
- DAI Chaobo. Review on fault detection method for fault current limiter[J]. Smart Grid, 2014(3): 22-29.
- [5] 缪希仁, 李 颀, 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(11): 75-81.
- MIAO Xiren, LI Biao, WU Xiaomei, et al. Research status and perspective of fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014(11): 75-81.
- [6] 李建平. 小波分析与信号处理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.
- LI Jianping. Wavelet analysis and signal processing [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2004.
- [7] 李 媛. 小波变换及其工程应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2010: 1-40.
- LI Yuan. Wavelet transform and its engineering application[M]. Beijing: Beijing Post and Telecommunications University Press, 2010: 1-40.
- [8] 张守中, 刘苗辉. 小波分析在非平稳速变信号处理中的应用[J]. 信息技术, 2012(15): 31-32.
- ZHANG Shouzhong, LIU Miaohui. The application of wavelet analysis to non-stationary signal processing[J]. Information Technology, 2012(15): 31-32.
- [9] 李章勇, 姜 瑜, 王 伟, 等. 基于小波变换的皮电信号滤波及奇异性检测[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(2): 1118-1122.
- LI Zhangyong, JIANG Yu, WANG Wei, et al. Based on wavelet transform, the filter and the singularity detection[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(2): 1118-1122.
- [10] 关维国, 姚清志, 高 阳, 等. 基于db4小波的配电网暂态电能质量扰动的检测与定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015(8): 102-106.
- GUAN Weiguo, YAO Qingzhi, GAO Yang, et al. Transient power quality detection and location of distribution network based on db4 wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2015(8): 102-106.
- [11] 任 震, 黄群古, 黄雯莹. 小波理论在电力系统微机保护中的应用研究[J]. 继电器, 2001(1): 1-4.
- REN Zhen, HUANG Qungu, HUANG Wenying. Application of wavelet theory in microcomputer protection of power system[J]. Relay, 2001(1): 1-4.
- [12] 赵 杰, 刘小靖, 胡仁芝. 实时检测与定位电网电压瞬时波动的Coiflets小波方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017(15): 8-14.
- ZHAO Jie, LIU Xiaojing, HU Renzhi. A coiflets wavelet method for real-timely detecting and locating transient surges of network voltage[J]. Power System Protection and Control, 2017(15): 8-14.
- [13] DAUBECHIES I. 小波十讲[M]. 李建平, 杨万年, 译. 北京, 国防工业出版社, 2004.
- AUBECHIES I. Ten lectures on wavelets[M]. LI Jianping, YANG Wannian, translation. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [14] 苏变玲. 基于小波变换的电力暂态和谐波信号检测方法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- SU Bianling. Research of monitoring ways to electric power transient and harmonic signal based on the wavelet transform[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2005.
- [15] 陈丽安, 张培铭. 基于形态小波的低压系统短路故障早期检测[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 24-28.
- CHEN Li'an, ZHANG Peiming. Early detection for short-circuit fault in low-voltage system based on morphology-wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 24-28.
- [16] 陈丽安, 张培铭, 缪希仁. 基于小波变换的低压系统短路故障的早期预测[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 91-94.
- CHEN Li'an, ZHANG Peiming, MIAO Xiren. Prediction for the short-circuited fault based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(2): 91-94.
- [17] 潘 睿, 刘俊勇, 倪雅琦, 等. 基于负荷预测及广义回归神经网络的短路电流超短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 94-99.
- PAN Rui, LIU Junyong, NI Yaqi, et al. Ultra-short forecasting for short circuit current based on load forecasting and general regression neural network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 94-99.
- [18] 饶贵安, 康宜华, 陈龙驹等. 一种新的实时小波分析[J]. 仪器仪表学报, 2005(2): 181-184.
- RAO Gui'an, KANG Yihua, CHEN Longju, et al. A new method of real time wavelet analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2005(2): 181-184.
- [19] 王 晶, 翁国庆, 张有兵. 电力系统的MATLAB+Simulink仿真与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版

- cuit-breakers:GB/T 4473—2008[S].2008.
- [6] High-voltage switchgear and controlgear Part 101: Synthetic testing:IEC 62271-101:2012[S].2012.
- [7] 董 玮,刘浩军,何 冰,等.容性电流开合试验中非保持破坏性放电与重击穿现象的评估[J]. 高压电器, 2016,52(1):175-179.  
DONG Wei,LIU Haojun,HE Bing,et al.Distinction between non-sustained disruptive discharge (NSDD) and restrike in capacitive current switching test[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(1):175-179.
- [8] IEC 62271-101/AMD1 ED2 17A/1149/FDIS[S].2017.
- [9] 刘 朴,刘 平,黄 实,等.特高压断路器容性电流开合合成试验方法研究[J]. 高压电器,2014,50(5):87-92.  
LIU Pu,LIU Ping,HUANG Shi,et al.Research of synthetic test method of capacitive current switching Test for UHV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014,50(5):87-92.
- [10] 尚振球,冯汝明,许晓勤.真空断路器NSDD问题的初步研究[J]. 高压电器,1986,22(4):13-17.  
SHANG Zhenqiu, FENG Ruming, XU Xiaoqin. Research of non-sustained disruptive discharges in vacuum circuitbreakers[J]. High Voltage Apparatus, 1986, 22(4):13-17.
- [11] GREENWOOD A. Vacuum switchgear[M]. Stevenage: The Institution of Electrical Engineers,1994.
- [12] SCHLAUG M,FALKINGHAM L T. Non-sustained disruptive discharges(NSDD) - A new investigation method leading to increased understanding of this phenomena [C]//Proceeding of 19th Institute Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Xi'an: IEEE,2000:490-493.
- [13] BERNAUER C, RIEDER W, KNY E. Non-sustained disruptive discharges in vacuum circuit-breakers[C]//Proceedings of 13th Institute Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.Paris:IEEE,1988: 338-340.
- [14] CHALY A M, DENISOV L V, POLUYANOV V N, et al.Peculiarities of non-sustained disruptive discharges at interruption of cable / line charging current[C]//Proceedings of 13th Institute Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.Paris:IEEE,1988: 335-337.
- [15] RYLSKAYA L A, PERTSEV A A. Dielectric strength of avacuum interrupter after current interruption[C]// Proceedings of 11th Institute Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.Berlin:IEEE,1984: 267-270.
- [16] DULLNI E, GENTSCH D, KLEBERG I, et al. Switching of capacitive current[C]//Proceedings of 21th Institute Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.Yalta:IEEE,2004:407-410.
- [17] ZALUCKI Z. Dielectric strength of vacuum contact gap after making current and no-load contact opening [C]//Proceedings of 20th Institute Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.Tours: IEEE,2002:75-78.
- [18] ZALUCKI Z. Restrike and reignition voltages of a shortcontact gap during capacitance switching using vacuumcircuit breakers[C]//Proceedings of 20th Institute Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.Tours:IEEE,2002:56-59.
- [19] 刘志远,杨 和.真空开关的电容器组投切[R].西安:西安交通大学,2012.  
LIU Zhiyuan,YANG He. Capacitor bank switching of vacuumcircuit-breaker[R]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2012.
- [20] 江文泉,李宏群,付 军.真空开关重击穿现象的模拟试验研究[J]. 高压电器,1996,32(5):9-14.  
JIANG Wenquan, LI Hongqun, FU Jun. Analog tests on capacitance switching with vacuum interrupters' restrike probability[J]. High Voltage Apparatus, 1996, 32 (5):9-14.
- [21] STL Guide to the Interpretation Ofiec 62271-100: Edition 2.1 2012-09 & Corrigendum 1 2012-12 High-voltage switchgear and controlgear Part 100: High-voltage alternating-current circuit-breakers[S].2017.
- 李 刚(1982—),男,硕士,高级工程师,从事高压电器试验研究。  
Control,2016(9):122-128.
- 刘宏森(1965—),男,本科,高工,主要从事电气工程领域的研究。
- 李迎华(1966—),男,本科,高工,主要从事电气工程领域的研究。
- 王 恒(1981—),男,本科,工程师,主要从事电能质量综合治理的研究。
- 袁 静(1988—),女,硕士,助理工程师,主要从事配网电压无功优化与电力系统仿真的研究。

(上接第230页)

社,2010.

WANG Jing,WENG Guoqing,ZHANG Youbing. MATLAB+Simulink simulation and application of power system[M]. Xi'an:Xi'an Electronic Science and Technology University Press,2010.

- [20] 任子晖,刘皓岳,徐进霞.基于小波变换和改进 Prony 方法的电能质量扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016(9):122-128.

REN Zihui,LIU Haoyue,XU Jinxia. Power quality disturbance analysis based on wavelet transform and improved pronymethod[J]. Power System Protection and