

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.02.003

基于 Park 变换的配电网多端行波故障定位方法

宁 一,王大志,江雪晨,张翠玲
(东北大学 信息科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 单端和双端行波定位方法都很难准确定位配电网故障,因此提出一种采用多端行波的配电网故障定位方法. 首先给出基于 Park 变换的自适应行波检测策略,在分析双端行波定位缺陷的基础上,根据检测到的行波到达各配电线路末端的时间,给出多端行波故障定位的原理. 该方法克服了由于配电线路结构复杂所造成的反射波识别困难,而且不受故障类型、故障初始相角和接地电阻大小的影响. 采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件和 MATLAB 软件对不同的故障工况进行仿真,仿真结果表明,本文方法能够快速准确地定位故障点,从而证实了该方法的有效性和可靠性.

关 键 词: 配电网;多端行波;故障定位;Park 变换;双端行波

中图分类号: TM 71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)02-0163-05

A Multi-terminal Traveling Wave Fault Location Method for Distribution Network Based on Park's Transformation

NING Yi, WANG Da-zhi, JIANG Xue-chen, ZHANG Cui-ling
(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: NING Yi, E-mail: vipningyi@126.com)

Abstract: It is difficult to accurately locate fault in a distribution network by one-terminal or two-terminal traveling wave method. So, a multi-terminal traveling wave fault location method was proposed. In this method, a self-adaptive strategy for traveling wave detection based on Park's transformation was made. The theory of multi-terminal traveling wave fault location method was established on the basis of analyzing the defects of the two-terminal traveling wave method. The detected arrival time of traveling wave on the terminal of distribution lines was used in fault location. The proposed method avoids the difficulty in recognizing reflect waves, and is independent of different fault types, fault inception angles and different fault resistances. Various fault cases in a distribution network were simulated by PSCAD/EMTDC and MATLAB. The results verify that the proposed method can locate fault point quickly and accurately, showing the method reliable and suitable.

Key words: distribution network; multi-terminal traveling wave; fault location; Park's transformation; two-terminal traveling wave

基于故障行波信号的故障定位技术基本不受过渡电阻、故障类型以及系统运行方式的影响,定位精度高,已在输电网获得了成功的应用^[1-2]. 但由于配电网多为树形拓扑结构,分支多,线路情况复杂,广泛应用于输电网的行波定位方法将面临适应性问题,不少学者对此进行了研究^[3-4]. 单端行波定位原理简单,难点是反射行波性质的识别;

由于配电网分支线路行波的干扰,识别更加困难,同时存在定位死区的问题. 频域行波法无须识别反射波的性质,但对于拓扑结构复杂的配电网,特征频率混叠导致的提取困难目前无法有效解决. 双端行波定位需要识别双端初始行波信号,并保证双端故障信息的时间同步. 随着数字信号处理器技术的发展,双端定位方法优势越来越明显,但

对于结构复杂的配电网,仅靠两端测量很难定位故障点位置.

行波故障定位的关键在于如何准确检测故障行波到达测量端时刻. 目前,比较有效的检测行波到达时刻的方法主要是小波变换 (wavelet transform, WT),但 WT 方法需要专门设置缓存区用于存储先前采样信号,从而提取信号特征,然后结合信号特征选取合适的母小波函数,否则难以获得满意效果^[5]. 文献[6-7]中提出利用 Park 变换 (亦称 TDQ) 检测行波到达时刻,该方法不需要缓存采样信号和提取采样信号特征,通过分析直轴分量信号就能适应任何故障类型,实现起来比 WT 方法更简单;但文献[6-7]中用于检测行波的阈值被设置成固定值,使得文献[6-7]方法对电力噪声的抗敏感能力降低,从而影响行波检测的可靠性.

综上所述,本文提出一种基于 TDQ 的配电网多端行波故障定位方法. 在文献[6-7]基础上,通过采用自适应阈值,提高行波到达时刻检测的可靠性,然后分析双端行波故障定位原理,给出一种适用于拓扑结构复杂的配电网故障定位策略,最后利用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型. 对不同的故障工况进行仿真,结果证实该方法有效,测距精度高.

1 基于 TDQ 的行波检测法

1.1 直轴分量信号的处理

配电网线路情况复杂,某些场合只能利用电压行波信号计算故障距离 (如单出线的铁路自闭贯通线),且我国中低压配电网多采用小电流接地运行方式,故障发生后暂态电流行波的幅值小,受干扰影响较大,不易检测,因此本文基于电压信号展开分析.

将配电系统三相电压的 A, B, C 三维坐标 abc 转换为 dq 旋转坐标系下的二维坐标:

$$\begin{bmatrix} V_d(k) \\ V_q(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{dq} \begin{bmatrix} V_a(k) \\ V_b(k) \\ V_c(k) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_{dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \cos(\varphi - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\varphi + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \varphi & -\sin(\varphi - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\varphi + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中: $V_{a/b/c}(k)$ 表示 A/B/C 相第 k 个电压采样信号; $V_{d/q}(k)$ 表示第 k 个三相电压信号在 dq 旋转

坐标系下的直轴/交轴分量; $\varphi = k\omega\Delta t + \theta$, 其中, ω 表示工频角速度, Δt 为采样间隔, θ_v 表示 V_a 的相角, $\theta = \theta_v + \Delta\theta$, $\Delta\theta$ 为 V_a 与 V_d 的夹角.

$$\left. \begin{aligned} V_a(k) &= A_{am} \sin(\omega k \Delta t + \theta_v) , \\ V_b(k) &= A_{bm} \sin(\omega k \Delta t + \theta_v - 120^\circ) , \\ V_c(k) &= A_{cm} \sin(\omega k \Delta t + \theta_v + 120^\circ) . \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

联立式(1)、式(3),得到

$$V_d(k) = \frac{1}{3} \left\{ \left[A_{am} - \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm}) \right] \sin(2\omega k \Delta t + \theta + \theta_v) + \frac{\sqrt{3}}{2}(A_{bm} - A_{cm}) \cos(2\omega k \Delta t + \theta + \theta_v) - (A_{am} + A_{bm} + A_{cm}) \sin(\theta - \theta_v) \right\}. \quad (4)$$

对于三相平衡的配电系统而言,满足 $A_{am} = A_{bm} = A_{cm}$, 则式(4)简化为

$$V_d(k) = -A_{am} \sin(\theta - \theta_v). \quad (5)$$

令 $\theta = \theta_v$, 由式(4)、式(5)看出,当故障引起系统三相不平衡时, V_d 呈现为由正弦与余弦叠加的振荡波;而当系统处于平衡状态时, V_d 理论上等于 0.

通过上述分析可知, V_d 的波形在线路故障时会产生突变,通过提取该突变时刻即可检测故障行波的到达时刻. 考虑到高阻接地故障和故障初始相角较小可能导致 V_d 的突变微弱至不可测,同时为了削弱电力噪声的影响,文献[8]提出了增量 c_{dif} 和能量系数 ξ_{dif} 的概念:

$$c_{dif}(k) = V_d(k) - V_d(k-1), \quad (6)$$

$$\xi_{dif}(k) = \sum_{n=k-\Delta k_{EN}+1}^k [c_{dif}(n)]^2. \quad (7)$$

式中: $\xi_{dif}(k)$ 表示第 k 个 c_{dif} 数据窗的能量; Δk_{EN} 为半个工频周期的采样数.

给出单相接地故障时 V_d , c_{dif} 和 ξ_{dif} 波形的仿真示例,如图 1 所示. 由于受电力噪声的影响,在故障发生前 V_d 和 c_{dif} 波形会出现明显振荡,这些振荡可能对准确检测行波到达时刻造成影响;而 ξ_{dif} 波形在故障发生前相对平滑,因此, ξ_{dif} 比 V_d 和 c_{dif} 更适合用于检测行波.

1.2 行波到达时刻的检测

文献[6-7]通过设置的固定阈值来检测由故障引起的 ξ_{dif} 波形突变的时刻,当 $\xi_{dif}(k)$ 第一次大于该阈值时,第 k 个采样点对应的时刻即为行波到达测量端的时刻;但不同电压等级及环境变化都会造成系统中电力噪声的变化,如果采用固定阈值,这些变化将影响行波检测的准确性和可靠性. 为了克服这个问题,本文提出采用自适应阈值检测 ξ_{dif} 波形突变的时刻. 所谓自适应是指根据

故障发生前系统中电力噪声等级自动调整阈值. 自适应阈值 η 由故障引起 ξ_{dif} 突变前长度为 Δk_η 的 ξ_{dif} 数据窗中最大值与最小值的比值得到, 如式 (8) 所示.

$$\eta = \frac{\max\{\xi_{\text{dif}}(k)\}}{\min\{\xi_{\text{dif}}(k)\}}, 1 \leq k \leq \Delta k_\eta. \quad (8)$$

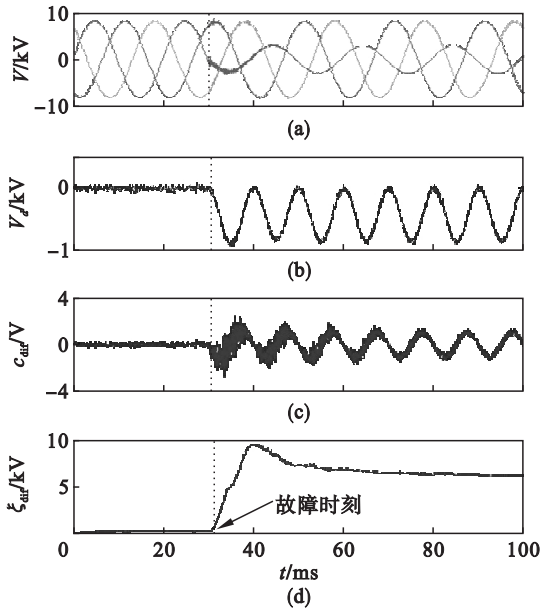


图1 单相接地故障时 V_d , c_{dif} 和 ξ_{dif} 的波形
Fig. 1 Waveform of V_d , c_{dif} and ξ_{dif} when single-phase grounding fault

(a)—三相电压; (b)—直轴分量;
(c)—增量; (d)—能量系数.

设置一个长度为 Δk_{η_1} 的 ξ_{dif} 数据窗, 并按 Δt 步长移动. 将该数据窗中第 1 个采样值 $\xi_{\text{dif}}(f)$ 比上最后一个采样值 $\xi_{\text{dif}}(l)$, 若比值第一次大于 η , 则可确定该数据窗最后一个采样点对应的时刻为行波到达时刻, 行波检测过程如图 2 所示. 需要说明的是, 为了提高 η 的准确性, 必须满足 $\Delta k_{\eta_1} < \Delta k_\eta$, 同时为了保证长度为 Δk_{η_1} 的 ξ_{dif} 数据窗能有效包含故障前后部分, Δk_{η_1} 的取值不能太小, 因此, 基于仿真分析, 本文取 $\Delta k_\eta = 2N$, $\Delta k_{\eta_1} = N/10$ (N 为一个工频周期的采样数).

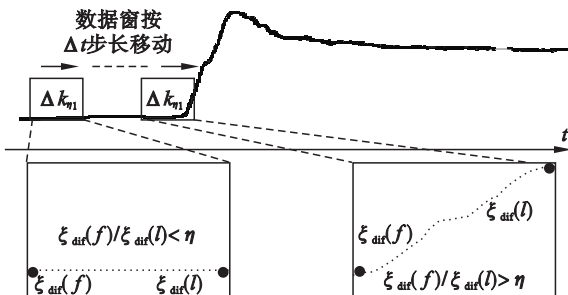


图2 行波的检测过程

Fig. 2 Traveling wave detection process

2 多端行波故障定位方法

2.1 双端行波定位存在的缺陷

双端行波定位原理是通过在线路两端安装的时间同步测量装置获取时间同步的行波信号, 经过行波检测方法分别提取行波到达两端测量点的时刻, 然后利用行波到达时刻、线路长度和行波波速三者间的逻辑关系构建故障距离的求解公式.

考虑某树形配电系统如图 3 所示, M, N, \dots, Q 为各线路末端, S_1, S_2, S_3 为交叉节点, 根据双端行波定位原理只在 M, N 端安装时间同步测量装置. 假设在 t_0 时刻线路发生故障, 由故障点电压信号突变而产生的电压行波到达 M, N 的时刻分别为 t_M, t_N . 本文按照故障点位置将故障分为测点 M, N 的连通线路故障和测点 M, N 的非连通线路故障两类, 分别对应图 3 中 F_1, F_2 . 所谓测点 M, N 的连通线路是指测点 M 和 N 间相连的线路 MN (两个测点之间只有唯一一条), 如图中虚线所示; 测点 M, N 的非连通线路则指除连通线路 MN 外的其他线路, 如图 3 中实线所示.

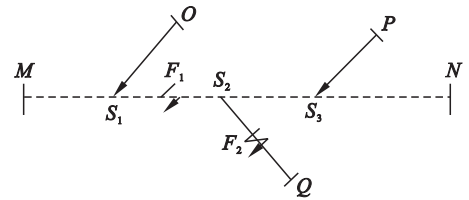


图3 配电系统结构示意图

Fig. 3 Structure of distribution system

当配电系统发生连通线路故障时, 有如下关系成立:

$$L_{MF_1} - L_{NF_1} = v(t_M - t_0) - v(t_N - t_0), \quad (9)$$

$$L_{MF_1} + L_{NF_1} = L_{MN}. \quad (10)$$

式中: v 为行波波速; L_{xy} 为点 x 至点 y 的距离, 例如 L_{MF_1} 表示故障点 F_1 至点 M 的距离.

将式 (9)、式 (10) 联立可得

$$L_{MF_1} = \frac{v(t_M - t_N) + L_{MN}}{2}. \quad (11)$$

若故障为非连通线路故障时, 存在如下等式:

$$L_{MF_2} - L_{NF_2} = v(t_M - t_0) - v(t_N - t_0). \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{MF_2} &= L_{MS_2} + L_{S_2F_2}, \\ L_{NF_2} &= L_{NS_2} + L_{S_2F_2}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$L_{MS_2} + L_{NS_2} = L_{MN}. \quad (14)$$

将式 (13) 代入式 (12) 中, 再与式 (14) 联立可得

$$L_{MS_2} = \frac{v(t_M - t_N) + L_{MN}}{2}. \quad (15)$$

将式(11)和式(15)对比可知,两者右侧完全相同,都由双端行波定位原理推理得到,但计算结果表示的含义却有差异:对于连通线路故障而言,计算结果表示故障点至测量点的距离,而对于非连通线路故障而言,计算结果表示故障线路与连通线路的交叉节点至测量点的距离.因此,双端行波定位方法对非连通线路故障无效,对于结构复杂的配电网,只靠两端测量很难定位故障点位置.

2.2 多端行波故障定位流程

针对双端法在配电网故障定位应用上的缺陷,本文在配电网每条线路的末端都配置含有精确同步时钟的测量装置,以保证各端信号时间同步;基于此,提出采用多端电压行波的配电网故障定位方法.故障发生后,故障电压行波将沿着线路向整个配电网传播,按照第 1 节中方法分别检测电压行波到达各测量点时刻.以图 3 所示系统为例,此时假设到达各线路末端的时间为

$$T = \{t_M, t_N, t_O, t_P, t_Q\}.$$

时间数据 T 将通过通用分组无线服务技术(GPRS)传回变电站中心.多端电压行波定位的关键是如何通过传回的时间数据 T ,结合实际的配电网拓扑结构,找出故障发生的位置.下面给出采用多端电压行波定位配电网故障的流程:

1) 将变电站中心接收的时间数据 T 按照时间先后顺序进行排序,选定行波波速为光速的 98%.

2) 从时间数据 T 中提取时间最短的前两个时间 t_x, t_y .根据双端定位原理得出

$$L = \frac{v(t_x - t_y) + L_{xy}}{2}. \tag{16}$$

其中, L_{xy} 表示测点 X 和 Y 间的连通线路 XY 的长度.配电网拓扑结构确定后, L_{xy} 是已知的.

3) 若在连通线路 XY 上距测量点 X 的距离为 L 的点,不与连通线路 XY 上任何交叉节点重合,此时,故障可确定发生在连通线路 XY 上,测距结果为 $L_{xf} = L$ (L_{xf} 为故障点 F 所在位置至测量点 X 的距离),故障定位结束,否则跳到步骤 4).

4) 若在连通线路 XY 上距测量点 X 的距离为 L 的点靠近连通线路 XY 上的某交叉节点时,故障可能位于连通线路 XY 之外,此时,将 t_y 从时间数据 T 中删除,返回步骤 2).

3 算例仿真

3.1 仿真模型

通过 PSCAD/EMTDC 建立如图 3 所示中性

点经消弧线圈接地的 10 kV 配电网仿真模型.线路参数如下:导线型号为 LGJ - 240,直径 21.6 mm,土壤电阻率 $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$,直流电阻 $0.118 \Omega/\text{m}$,线路为平行排列,相间距离 0.7 m,垂直高度为 7 m.故障行波的特征频段为 10 ~ 100 kHz(或更高),且传统电磁式电压互感器能有效传输 100 kHz 以上的暂态电压信号,为提高行波检测精度和满足采样定理,本文采样频率取 1 MHz.

通过 PSCAD 仿真模型模拟各种线路故障情形,将获取的故障仿真数据用 MATLAB 软件作进一步处理,再基于本文方法利用处理后的数据定位故障点在配电网中的位置.

3.2 故障定位示例

假设距离 M 点 14 km,在线路区段 S_1S_2 上发生 A 相接地故障,过渡电阻为 10 Ω .

根据第 1 节中方法检测故障行波到达各测量点时刻,到达 M, N, O, P 和 Q 的时间分别为 46.75, 97.22, 53.08, 103.89 和 60.71 μs .按时间先后顺序排序 $t_M < t_O < t_Q < t_N < t_P$,得出时间最短的前两个时间为 t_M 和 t_O .测量点 M 与测量点 O 间的连通线路 MO 长度 $L_{MO} = 18 \text{ km}$,将相关参数代入式(16)中,得出 $L = 8.052 \text{ km}$.在 MO 线路上,距离 M 为 8.052 km 的点靠近交叉节点 S_1 ,则故障可能位于线路 MO 之外,继续进行故障定位.从时间数据中删除 t_O ,此时时间数据中时间的先后顺序为 $t_M < t_Q < t_N < t_P$,选取时间最短的前两个时间为 t_M 和 t_Q ,测量点 M 与测量点 Q 间的连通线路 MQ 长度 $L_{MQ} = 32 \text{ km}$,将相关数据代入式(16),计算得到 $L = 13.914 \text{ km}$.在 MQ 线路上,距离 M 为 13.914 km 的点不与任何交叉节点重合,故障定位结束,可判断故障位于线路区段 P_1P_2 上,距 M 点 13.914 km 处,计算结果与实际故障距离只相差 0.086 km.

3.3 故障定位结果分析

实际运行经验表明,线路接地故障多发生在相电压峰值附近时刻,为高压击穿性故障,发生电压过零附近的单相接地故障概率很小,因此,在下面的仿真分析中,初始相角最小取 30°.对不同故障初始相角和不同过渡电阻时的配电线路故障进行仿真,部分定位结果如表 1 所示.由表 1 可知,本文方法基本不受故障初始相角和接地电阻的影响,定位精度较高.

表 1 故障定位结果
Table 1 Fault location results

故障位置	初始相角 (°)	过渡电阻 Ω	测距结果 km	绝对误差 km
位于 MS_1 上,距离 M 端 3 km	90	10	2.924	0.076
	90	100	2.917	0.083
	90	500	3.051	0.051
	30	500	2.856	0.144
位于 OS_1 上,距离 O 端 8 km	90	500	7.923	0.077
	60	100	7.919	0.081
	60	500	8.102	0.102
	30	500	8.156	0.156
位于 S_2S_3 上,距离 N 端 19 km	90	500	18.922	0.078
	60	500	18.874	0.126
	30	10	19.196	0.196
	30	100	19.088	0.088
	30	500	18.825	0.175

文献[9-10]指出,离散小波变换(DWT)和极大重叠离散小波变换(MODWT)在行波的检测上表现相对出色,然而 TDQ 实现起来更为简单,不需要缓存采样信号,不受带宽限制.为评价本文行波检测方法的性能,将三种行波定位方法进行比较,结果如表 2 所示.给出相对误差 ε_r 的表达式:

$$\varepsilon_r = \frac{|L_F - L_F^*|}{L} \times 100\% . \tag{17}$$

式中: L 为故障线路长度; L_F 为实际故障距离; L_F^* 表示用定位方法得出的故障距离.

表 2 基于 DWT,MODWT 和 TDQ 方法的性能评价
Table 2 Performance evaluation of DWT-, MODWT- and TDQ-based methods

故障类型	相对误差 ε_r				
	TDQ	DWT		MODWT	
		db4	db6	db4	db6
高阻接地	0.84	0.95	1.12	0.85	0.92
极小初始相角	0.94	1.04	1.28	0.92	1.06

基于 DWT 和基于 MODWT 方法的定位精度受母小波选取的影响明显(通过选取 db4 和 db6 两种不同母小波验证了这一点),并且 DWT 需要经历降采样,因此,其定位精度为三者中最低,而本文方法能达到与 MODWT 方法相似的精度.

4 结 语

本文在双端行波定位原理基础上提出基于 TDQ 的配电网多端行波故障定位方法,该方法省

去了由于配电线路结构复杂造成反射波识别困难的问题,且不受故障类型、故障初始相角和接地电阻大小的影响,是解决配电网故障定位的一种可行方法.采用 PSCAD/EMTDC 对不同的故障工况进行仿真,结果证实了该方法的有效性和可靠性.多端电压行波故障定位需要在每条线路末端安装同步测量装置,这将增加设备投资与维护费用.本文后续工作将在现有电磁式电压互感器基础上,开发一套简化的时间同步采集装置,只需具备波头检测和通信功能即可,以降低投资成本.

参考文献:

[1] Izykowski J, Rosolowski E, Balcerek P, et al. Accurate noniterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2010,25(1):72-80.

[2] Lopes F V,Silva K M,Costa F B,et al. Real-time traveling-wave-based fault location using two-terminal unsynchronized data [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2015,30(3):1067-1076.

[3] Gilany M,Ibrhim D K,Eldin E S T. Traveling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged underground cables system[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2007,30(1):82-89.

[4] 梁睿,靳征,王崇林,等.行波时频复合分析的配电网故障定位研究[J].中国电机工程学报,2013,33(28):130-136.
(Liang Rui, Jin Zheng, Wang Chong-lin, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of travelling wave time and frequency analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*,2013,33(28):130-136.)

[5] da Silva M, Coury D V, Oleskovicz M, et al. Combined solution for fault location in three-terminal lines based on wavelet transforms [J]. *IET Generation Transmission and Distribution Journal*,2010,4(1):94-103.

[6] Lopes F V,Fernandes D, News W L A. Fault location on transmission lines based on traveling waves [C/OL]//International Conference on Power Systems Transients. Delft, 2011. http://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2011/11IPST060.pdf.

[7] Gazzana D S,Ferreira G D,Bretas A S,et al. An integrated technique for fault location and section identification in distribution systems [J]. *Electric Power Systems Research*,2014,115:65-73.

[8] Benmouyal G,Mahseredjian J. A combined directional and faulted phase selector element based on incremental quantities [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2001,16(4):478-484.

[9] Livani H,Evrenosoglu C Y. A machine learning and wavelet-based fault location method for hybrid transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*,2014,5(1):51-59.

[10] Costa F B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2014,29(1):140-153.