

# 基于C型行波法的配电网故障定位的实用研究

于盛楠, 杨以涵, 鲍海

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 提出了利用C型行波法在配电网中进行故障定位的方法。该方法分两步进行, 第一步定出故障距离, 第二步定出故障分支。在线路始端注入高幅值窄脉冲并检测从线路返回的波形, 比较进行自适应滤波后正常和故障两种情况下的波形, 得到故障距离。提出行波传输的特征波的概念。通过分析故障录波的特征波, 来确定故障分支。将故障测距和故障分支结果结合起来达到精确定位。通过理论分析、ATP仿真及现场实验, 并对所得数据进行有效分析, 证明了该方法的正确性, 也说明该方法在配电网故障定位中是实际可行的。

**关键词:** 行波; 故障定位; 自适应滤波; 特征波

## Study on fault location in distribution network based on C-type travelling-wave scheme

YU Sheng-nan, YANG Yi-han, BAO Hai

(Institute of Electrical and Electronic Engineering, North China Electrical Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** A method based on C-type traveling-wave scheme for fault location in distribution network is put forward. There are two steps in this method. The first step is fault distance determination, and the second step is fault branch determination. Via injecting a signal with high voltage and narrow pulse, wave back from the lines is monitored. Comparing the normal and fault waveforms after adaptive filter, fault distance is calculated. The definition of feature-waveform in traveling-wave is brought out. Fault branch is fixed after analyzing the feature-wave of fault waveform. The results of the two steps make fault location accurately. After theoretical analysis, ATP simulation, experiments on spot and effective data analysis, this method is proved to be correct and practical.

**Key words:** traveling-wave; fault location; adaptive filter; feature waveform

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)10-0001-04

## 0 引言

随着我国工业的发展, 电力网络规模逐渐加大, 网络结构逐渐复杂, 用户对供电稳定的要求也越来越高。一方面, 在系统正常运行时要防止故障的发生; 另一方面, 在故障发生后尽快进行故障定位, 迅速排除故障, 保证系统运行安全, 将损失最小化。然而, 配电网的多分支结构给故障巡线带来诸多困难, 这就迫切需要一种自动进行故障定位的方法出现。

现阶段配电网故障定位的方法主要分为两类: 基于配网自动化系统的方法和行波法。两类方法各有其特点。基于配网自动化系统的方法从理论上说是最简明的方法, 通过各个 FTU 和 RTU 的返回信号, 利用各种数学算法进行寻址判断。但是这种方法有一个大前提是配网自动化系统大规模使用并且从其中获得的故障信息准确无误, 然而现在我国大部分

城市电力配电网并没有配备先进的配网自动化系统, 所以这种方法的实用的现实性较差。行波法是基于故障距离与行波从故障点传输到检测点的时间成正比的原理, 其中又分为 A、B、C、D、E、F 六型方法。其中只有 C 型方法, 也即单端注入行波法适用于多终端的配电网。C 型行波法的基本原理是在线路始端注入检测信号, 并通过注入信号时刻与故障点返回信号时刻的时差来确定故障位置, 这种方法从理论上说在配电网中是可行的。

由于配电网分支对信号的衰减和外界噪声干扰的影响, C 型行波法的数据处理存在很大困难, 所以一直没有得到广泛的实际应用。但是, 通过改进信号源, 使其发出高幅值窄脉冲, 就可以很大程度弥补分支带来的信号衰减; 使用数字滤波等方法进行数据处理, 就可恢复信号的本来面目, 进行故障测距。同时从所录波形中分析提取线路特殊点的特征波形, 就可以分析出正常情况和故障情况下的

网络拓扑结构,从而判定故障分支。

## 1 注入行波在带分支线路中的传输过程

行波在线路中的传输特点是遇到阻抗不匹配(不连续)点就会发生反射和折射。在传播前方波阻抗大于传播后方波阻抗时,返回同向行波,反之返回负向行波。在配电网中,阻抗不匹配点主要表现为分支点、开路点和短路点三类,分别返回负向、同向和负向行波。

图1表示的是一条以点O为起点,点B为终点,并在OB中的点A处带一条支路AC的线路。AB段内点S处发生单相接地故障。从O点发出检测信号 $W_1$ ,  $W_1$ 到达分支点A后沿三个路径传播: $W_{11}$ 透过A点沿分支AC传播; $W_{12}$ 透过A点沿分支AB传播,可以达到故障点S; $W_{13}$ 在A点发生反射,直接返回始端O点。 $W_{11}$ 到达C点时,遇到开路返回同向信号 $W_2$ ;  $W_2$ 返回A点时又有三个传输路径,其中透过A点的 $W_{21}$ 直接返回O点,另一个透射A点的 $W_{22}$ 沿分支AB传播,可以达到故障点S。 $W_{12}$ 与 $W_{22}$ 先后到达S点,遇到接地返回负向信号,此信号分成 $W_{32}$ 和 $W_{31}$ 两股,同时向A点和B点传输。由 $W_{12}$ 产生的 $W_{32}$ 遇到A点后的透射部分 $W_{33}$ 的波头成为第一个从S点返回始端的波头。 $W_{31}$ 到达B点后遇开路反射,其最终透射部分 $W_{41}$ 返回检测点。之后,信号继续在线路中往复传播,在A、B、C、S、O点发生反射和折射,直至衰减到零。

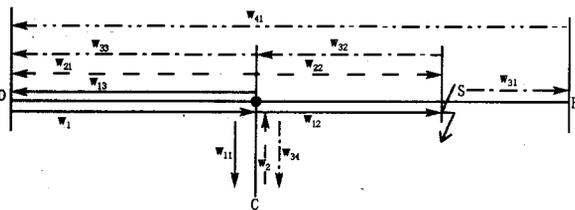


图1 行波在带分支线路中的传播示意图

Fig.1 Spread way of traveling-wave in line with branch

从上述过程中,可以看出行波在带分支线路中有以下传播特点:

(1)在只有一个分支点的线路中,信号遇到带有 $N$ 个分支的节点会分成 $N+1$ 股,当只有一处发生接地故障时,只有一股可以到达故障点。同时故障点返回的信号遇到该分支节点又要发生折反射,只有一股可以回到检测点,又经历了第二次衰减。

(2)在带有多个分支点的线路中,每经过一个分支点,信号就要按(1)所述衰减一次,故障点距线路始端越远,其衰减就会更强烈,在经过一定量的分支后,可能导致返回信号太小以致无法辨识。

(3)由于在分支点返回的信号是与短路故障点返回信号同方向的负向信号,所以必须加以识别,区分分支点和故障点。

## 2 自适应滤波理论与故障测距

利用C型行波法进行故障定位的第一步是故障测距。其原理是通过比较正常波形与故障波形找寻突变点,根据突变点距脉冲发出的起始时刻的时间差来计算故障距离。由于行波在线路中的传输速度与光速相当,寻找的突变点只要有 $1\mu\text{s}$ 的偏差就会使故障测距结果出现300m的误差。而现场所录波形虽然形态清晰,但却包含了大量高频噪声,若不将这些噪声滤除,就会对测量精度造成很大的影响。

自适应滤波理论是由Widrow B.等人在1967年提出的,并在近几十年内得到迅速发展。基于自适应滤波理论,在设计自适应滤波系统时只需知道很少的或者根本不需要任何关于信号与噪声的先验统计知识,其参数即可自动调整至最优状态,实现简单,并且滤波性能甚好。比较常用的自适应滤波算法有最小均方(LMS)算法和递归最小二乘(RLS)算法两种。经过对多种算法在对实验数据的处理速度和精度的比较后,选用了LMS自适应FIR滤波器。其原理如图2所示。自适应滤波器有两个输入端(主输入和参考输入)以及两个输出端(滤波器输出和误差输出)。信号源 $S(n)$ 中包含期望信号和噪声信号,经过传输系统 $H(z)$ 的频率特性影响,信号 $x(n)$ 将与主信号 $S(n)$ 不同,利用自适应滤波器可以从信号 $x(n)$ 中提取原来的主信号 $S(n)$ ,而噪声干扰被滤波作用抑制了。

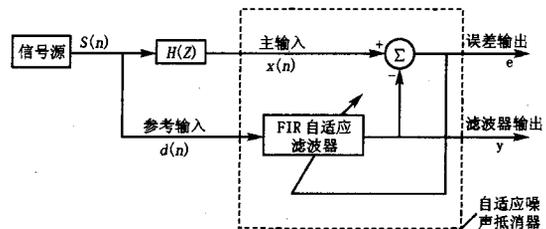


图2 自适应滤波器原理框图

Fig.2 Frame of the theory of adaptive filter

由于在注入行波到达故障点并返回之前时间内的所有波形是一致的,所以利用在离线状态下测得的滤波后的无故障时所录波形减去故障时所录波形,其中的第一个明显突变点所对应的时刻就是注入行波到达故障点又返回线路始端的时刻点,记为 $t$ ,而故障距离也可以简单的通过公式(1)计算出来:

$$S = v \times t/2 \quad (1)$$

其中: $S$ 表示故障距离,  $v$ 表示波速。

### 3 仿真及故障分支判别方法

计算出了故障距离, 下一个问题就是确定故障分支。利用特征波就可以很好地解决这个问题。特征波是指线路中的特殊点返回的波形, 这些特殊点包括线路始端、分支节点和各分支末端。首先利用 ATP 的仿真结果来说明。仿真中信号源采用脉宽为  $1\ \mu\text{s}$ , 幅值  $1000\ \text{V}$  的高压脉冲源, 线路波阻抗设置为  $300\ \Omega$ , 信号源经  $300\ \Omega$  电阻接入线路。波速采用  $300\ \text{m}/\mu\text{s}$ 。线路结构如图 3。

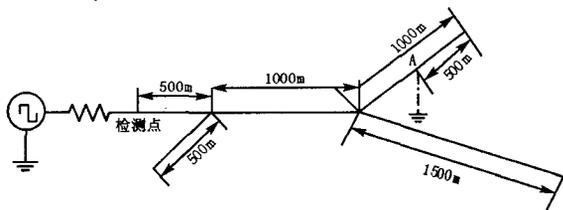


图3 仿真所用线路的拓扑结构

Fig.3 Line structure in simulation

在检测点采用  $100\ \text{M}$  的采样率进行采样, 分别得到开路波形 (图 4a) 和 A 点处发生单相接地故障时的故障波形 (图 4b), 以及开路波形与故障波形的相减波形 (图 4c)。从图可以很容易判断出相减波形的突变时刻为  $13.3\ \mu\text{s}$ , 即故障距离为  $13.3 \times 300/2 = 2000\ \text{m}$ , 与该线路故障情况一致。

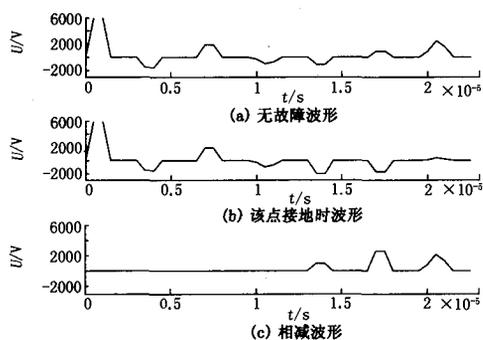


图4 仿真所得开路波形、A点故障时波形以及相减波形

Fig.4 Waveforms in simulation

接下来分析故障所在分支。首先观察开路波形。第一个特征向上为信号源, 第二个特征向下为第一个分支点返回特征, 第三个特征向上为第一个分支末端返回特征, 第四个特征向下为第一个分支点特征来回反射的结果, 第五个特征向下为第二个分支点的返回特征, 第六个特征向上为第二个分支点后较短分支的返回特征, 第七个特征向上为第二个分支点后较长分支的返回特征。再看故障波形。很明

显, 第六个特征变为向下, 且第二个分支点后较长分支的返回特征虽减弱但仍然存在, 所以故障位置在第二个分支点后的较短分支上。

### 4 现场实验及其数据的处理分析

经过上述理论分析, 得到 C 型行波法在配电网故障定位中是可行的这一结论。此结论在北京市大兴区与当地供电公司合作进行的实验中得到验证。该实验的实验条件为一条  $35\ \text{kV}$  线路, 主线延伸至  $5291\ \text{m}$  处连接 3 条分支, 其中较短的一条  $2349\ \text{m}$ , 较长的两条长度相等, 为  $5900\ \text{m}$ 。分别设置了主线近、主线远、分支点、短分支中、短分支末端、长分支中和长分支末端共计 7 个实验点。实验在该线路停电状态下进行 (该变电站的其余线路正常运行)。由脉冲信号源发出  $4\ \text{kV}$  的高幅值类三角波脉冲, 脉宽  $10\ \mu\text{s}$ , 由线路始端注入。同时在始端使用采样率为  $100\ \text{M}$  的型号为 Tek 3014B 的高速示波器接收已分压衰减 20 倍的返回波形, 通过 RS-232 串口将示波器数据转存入电脑程序, 并输出故障定位结果。限于篇幅, 下面仅以第 6 点的情况作为典型进行说明。

图 5 的左侧三副图分别为开路录波、第 6 点处直接接地的故障录波以及二者的相减波形。其中纵坐标代表电压幅值 (单位:  $\text{V}$ ), 横坐标代表时间 (单位:  $\text{s}$ )。右侧三副图分别为对应左侧波形经自适应滤波的结果。自适应滤波器采用的是凯塞窗的 FIR 型 LMS 自适应数字滤波。经滤波后, 原始波形中的噪声干扰基本消除, 且波形形状没有改变。计算结果的相对误差仅为  $+1.4\%$ 。

但是, 仅仅使用这样的波形希望程序输出故障分支是比较困难的, 所以采用了峰值法提取特征波。首先根据线路总长确定有用波形的时间范围, 丢弃冗余信息。接着抽取波形中所有的峰值和谷值点, 并记录下来。最后比较这些保存点, 除去对判别分支没有作用的点。最终计算提取的开路波形和第 6 点故障波形的特征波如图 6。其中图 6 上为开路波形特征波, 第一个特征向上为信号源发出特征, 第二个特征向下为分支点特征波, 第三个特征向上为短分支特征波, 第四个特征向上为长分支特征波。且由于该线路有两条长度相等的长分支, 所以第四个特征的幅值高于第三个特征。图 6 下为第 6 点故障波形的特征波, 与图 6 上相比, 它缺少了短分支的特征波, 从而判断故障发生在短分支上, 这与实

际情况是完全一致的。

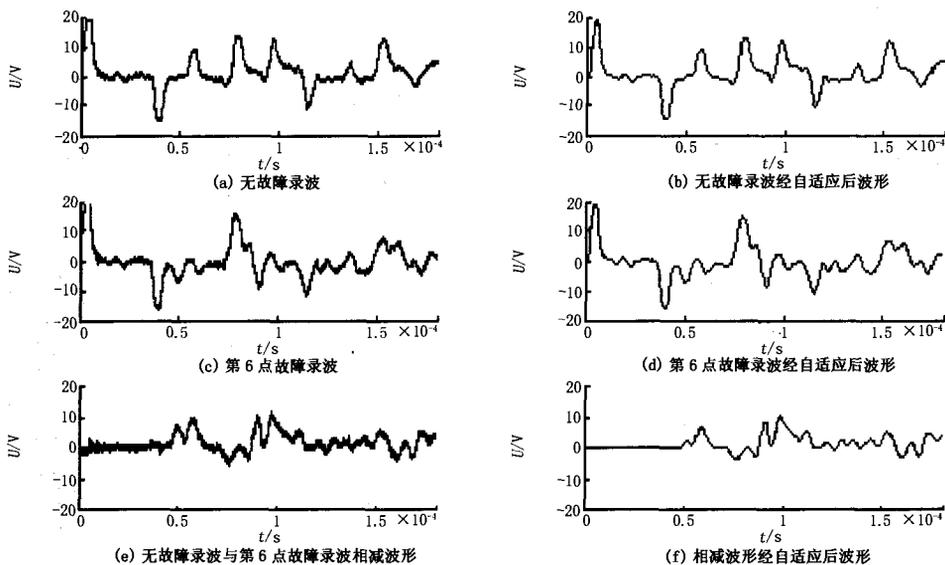


图5 开路波形、第6点故障的故障波形及其经自适应滤波的结果

Fig.5 Waveforms of both open and fault on 6th point situation and their results after adaptive filter

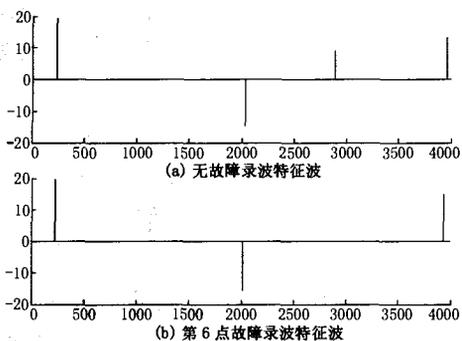


图6 无故障时波形的特征波和第6点故障波形的特征波

Fig.6 Feature-waveforms of open and fault on 6th point

当波速取 284 m/μs 时，将实验中其余实验点的故障定位结果汇总如表 1。可见，通过“C 型行波法——自适应滤波故障测距——特征波故障定位”的流程进行离线故障定位，测距相对误差不超过 ±1.5%，故障定位结果准确可靠。

表 1 各个实验点的故障定位结果

Tab.1 Fault location results for each experiment point

实验点	1	2	3	4	5	7
故障距离/m	2115	3879	5291	8070	11191	7640
测定距离/m	2144.2	3890.8	5296.6	8150.8	11132.8	7611.2
绝对误差/m	+29.2	+11.8	+5.6	+80.8	-58.2	-28.8
相对误差/(%)	+1.3	+0.3	+0.1	+1	-0.5	-0.3
故障位置	主线	主线	分支点	长分支	长分支	短分支
特征波定位	主线	主线	分支点	长分支	长分支	短分支

### 5 结论

通过理论分析、ATP 仿真及现场实验，并对所

得数据进行有效分析，最大误差不超过 ±1.5%，证明了 C 型行波法的正确性，也说明该方法在配电网故障定位中是实际可行的。

现场噪声是对所测数据的最大干扰，精确定位需要有效的数据处理方式。通过将离线状态下的开路波形与接地故障波形相减，并采用自适应滤波器进行有效滤波后隔点差分，找到连续多点大于 0 中的第一个点，即故障点返回波的波头到达时刻，即可进行精确测距。

故障所在分支的判别采用特征波法，清楚地展示出每个特征所对应的线路特殊点，从而明确了故障所在具体位置。与故障测距结果相结合得到精确的故障定位。

实践证明这种方法在 35 kV 线路中应用良好，如能进一步解决复杂的 10 kV 配电网故障定位问题，将是技术上的一大突破。

### 参考文献

[1] 裴善鹏, 连鸿波, 李万彬, 等. 快速调匝式消弧线圈及接地选线一体化装置研究[J]. 现代电力, 2006, 23(1): 20-24.  
 PEI Shan-peng, LIAN Hong-bo, LI Wan-bin, et al. Research on the Incorporate Device of Quick Multi-tap Arc-suppression Coil and Detection of Earth Fault Feeder [J]. Modern Electric Power, 2006, 23(1): 20-24.  
 [2] Johns A T Whittard. New Technique for the Accurate Location of Earth Faults on Transmission System[J]. IEE Proc on Gener, Transm and Distrib, 1999, 142(2): 73-79.

(下转第 12 页 continued on page 12)

络,仍需要临时措施。

### 3.3 单电源双回线运行

无论正常或检修方式下出现的双回线(包括小环网)运行,均与单回线有一定的差别。仍按末端变压器均接地运行考虑。如果靠改首端后备保护定值的方法来满足系统稳定和保护配合的要求,在区外故障情况下,可能同时失去双回线,这显然不合理。

对单相接地故障,11、15保护不能保证区内全线速动,只能依赖首端接地距离I段动作后,末端纵联零序延时相继动作(一般保护动作时间会在100ms后)。但如果保护启动后,直接选为相间故障,投入纵联相间距离,相间距离又不能停信,保护将转入振荡闭锁子程序,靠振荡闭锁程序中的纵联零序延时三跳。

对相间故障,11、15保护不能保证区内全线速动,只能依赖首端距离I段动作后,末端纵联距离相继动作。但纵联距离只投入100ms,而且保护启动后,相间距离不能停信,保护将转入振荡闭锁子程序,纵联拒动,只能依赖后备保护动作。若开始时,末端保护不启动(如负荷较小),在首端故障切除时保护启动,末端保护能正确动作。101、901、602等保护也不保证区内全线速动,但首端距离I段动作后,末端纵联距离能相继动作。

因此,凡配有11、15保护的线路,应计算相间和接地距离I段的保护范围,对保护范围末端的短路进行详细分析,力争使距离I段与纵联保护的停信及选相元件的灵敏度之间获得良好的配合关系,否则保护应投三重方式,以解决保护三跳的问题。

11、15保护在发生相间故障时,可能拒动,属于安全隐患,尚无可靠合理的处理措施,应尽快在单电源线路上更换此类保护。

## 4 结束语

运行单位除了在保护运行上采取必要的对策外,在保护配置、保护整定等方面也要注意,如各停信、差动元件整定时除考虑正常运行的灵敏度外,还要考虑作为单电源线路运行时的灵敏度。在系统接线及运行方式方面要注意不宜出现单电源串供的网络结构,不宜在单电源局部网络中使用3/2主接线,末端变压器一般要接地运行等。制造单位应着力改进纵联方向、距离保护,增强弱馈功能的自适应能力,增强末端选相能力。由于单电源辐射线路日益增多,要保证其保护的可靠运行,就需要研究、制造、运行等单位广大专业技术人员不懈的努力,从而实现保护配置更加可靠、技术更为先进、运行更为灵活的目标,适应不断发展的电网,满足电网对继电保护的要求。

收稿日期:2006-11-06

作者简介:

常凤然(1967-),男,高级工程师,主要从事继电保护工作;E-mail:cfr@hbpc.com.cn

张洪(1964-),女,高级工程师,主要从事继电保护工作;

周纪录(1964-),男,高级工程师,主要从事继电保护工作。

(上接第4页 continued from page 4)

[3] Bo Z Q. Accurate Fault Location Technique for Distribution System Using Fault-generated High-frequency Transient Voltage Signals[J]. IEE Proc on Gener, Transm and Distrib,1999, 146(1): 73-79.

[4] 何振亚.自适应信号处理[M].北京:科学出版社,2002.

[5] Diniz P S R.自适应滤波算法与实现[M].北京:电子工业出版社,2004.

[6] 陈平,葛耀中,徐丙垠,等.现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用-A型原理[J].继电器,2004,32(2):13-18.

CHEN Ping, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Modern Traveling Wave Based Fault Location Principle and Its Application to an Actual Fault Analysis—Type A Principle [J]. Relay,2004,32(2):13-18.

[7] 陈平,葛耀中,徐丙垠,等.现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用-D型原理[J].继电器,2004,32(3):13-18.

CHEN Ping, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Modern Traveling Wave Based Fault Location Principle and Its Application to an Actual Fault Analysis—Type D

Principle [J]. Relay,2004,32(3):13-18.

[8] 严凤,杨奇逊,齐郑,等.基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(9):37-42.

YAN Feng, YANG Qi-xun, QI Zheng, et al. Study on Fault Location Scheme for Distribution Network Based on Travelling Wave Theory [J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):37-42.

收稿日期:2006-12-16

收稿日期:2007-02-06

作者简介:

于盛楠(1983-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行分析与控制;E-mail:sonia-fish@163.com

杨以涵(1926-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行分析与控制、人工智能在电力系统中应用等;

鲍海(1968-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行分析与控制、虚拟仪器等。