# 基于广域行波波头频率分量幅值比信息的 输电网非同步故障定位

彭 楠<sup>1,2</sup>,王 政<sup>1,2</sup>,梁 睿<sup>1,2</sup>,杨 智<sup>1,2</sup> (1. 中国矿业大学 电气与动力工程学院,江苏 徐州 221116; 2. 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:现有电网行波故障定位方法大多依赖行波到达时间和波速信息,需要精确同步。提出一种利用线模电 压初始行波波头频率分量幅值比信息的输电网故障定位方法。该方法基于初始行波波头频率分量幅值的衰 减特征和行波最短传播路径,采用虚拟故障点法,利用全网测量点的实际和理论幅值比差值构建故障线路识 别判据;在保证训练普适性和少训练样本的前提下,利用径向基函数(RBF)神经网络拟合初始行波波头2个 不同频率分量幅值比与故障距离的非线性关系实现故障精确定位。所提方法只需初始行波波头较低的频率 分量幅值比信息,无需全网布置测量点和精确同步。在 PSCAD/EMTDC 中建立了 IEEE 30 节点系统的仿真 模型,仿真结果表明所提方法定位精确、可靠性较高。

关键词:线模行波;幅值比;非同步测量;故障定位;输电网;RBF神经网络

中图分类号:TM 726 文献标识码:A

0 引言

早期电网故障定位主要依赖线路保护和运维人员巡线。实际上,由于各条线路的保护相互独立,所有故障信息的利用率低下,同时故障巡线费时又费力,上述2种方式不符合智能电网故障定位的要求。许多学者提出了各种电网故障定位方法,主要可以分为阻抗法和行波法<sup>[1-2]</sup>。阻抗法简单,但易受故障状况和电弧等因素影响;行波法利用初始行波波头到达电网各测量点的时刻进行故障定位,定位精度高且不受电弧等因素影响,应用广泛。

随着信号处理<sup>[3-4]</sup>、广域测量<sup>[5-6]</sup>、信息融合<sup>[7]</sup> 等技术的发展,行波法有了进一步的提升。文献 [8]利用多信号分类算法提取各测量点电流行波信 号的暂态主频来计算不同的行波传播路径,从而确 定复杂电网中的故障线路。文献[9]利用信息融合 技术分析初始行波波头的到达时间,采用故障行波 网络定位法确定故障位置。文献[10]基于信息融 合技术,提出了充分利用所有子站记录的初始行波 波头到达时刻信息进行故障定位。基于广域测量的 行波故障定位算法的精度和可靠性虽然较高,提升 了行波法在电网中的应用价值,但其需要精确的同

#### 收稿日期:2018-08-28;修回日期:2019-01-17

基金项目:2017年国家重点研发计划项目(2017YFC080-4400);江苏省自然科学基金资助项目(BK20161185);江苏 省"六大人才高峰"项目(XNY-046)

Project supported by 2017 National Key Research and Development Program of China(2017YFC0804400), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20161185) and the "Six Talents Summit" High-level Talents Project of Jiangsu Province (XNY-046) 步测量[11-12]。

近年来,有关学者详细研究了线模和零模行波 波头幅值、波速随传播距离的变化规律,为基于行波 幅值衰减特征的故障定位方法奠定了理论基础<sup>[13]</sup>。 文献[14]首次利用零模行波波头2个不同频率分量 的幅值比与故障距离的关系实现了配电线路故障定 位,该方法无需同步测量,但仅适用于配电线路。

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.009

高压电网的输电线路较长,行波波头的色散和 衰减较配电网线路更加显著。本文利用线模行波波 头多频率分量的幅值衰减特征,构建S变换提取的 初始行波波头多频率分量实际幅值比与虚拟故障点 法计算的理论幅值比差值信息,可靠确定故障区域 和故障线路;利用故障线路一端测量点初始行波波 头的2个不同频率分量幅值比与故障距离的拟合关 系,实现精确定位。

# 1 模量电压行波幅值衰减和色散

对于1条同型输电线路而言,距离故障点 *x* 处的模量电压初始行波波头信号 *U*<sup>(m)</sup>(*x*)可以表示<sup>[14]</sup>为:

$$\boldsymbol{U}^{(m)}(x) = \sum_{k} \frac{A^{(m)}}{\omega_{k}} e^{-[\alpha_{k}^{(m)} + j\beta_{k}^{(m)}]x}$$
(1)

其中,上标 m=0 表示零模行波,m=1 表示线模行 波; $A^{(m)}$  为模量电压行波的初始幅值,与故障状况、 沿线电压分布等因素有关; $\omega_k$  为信号分量的角频 率; $\alpha_k^{(m)}$  和 $\beta_k^{(m)}$  分别为角频率  $\omega_k$  下模量行波传播 常数的实部和虚部。

由式(1)可知,发生故障后模量电压初始行波 波头信号中包含了各种频率分量;随着传播距离的 增加,不同频率分量幅值振荡衰减的程度不同,主要 与该频率分量下的行波传播常数的实部  $\alpha_k^{(m)}$ 、传播 距离 x、信号频率  $\omega_k$  有关。

在 PSCAD 中搭建 1 条电压等级为 220 kV、长度 为 100 km 的输电线路,并在距离其首端 80 km 处模 拟 A 相接地故障,设置故障电阻为 100 Ω,并在故障 点处以及距离故障点 20 km、30 km、40 km、50 km、 60 km处分别设置电压行波测量点。利用 S 变换分 别提取不同测量点处的零模和线模电压行波波头信 号中不同频率分量的幅值。以故障点处初始模量电 压行波波头中各频率分量的幅值为参考,可以用其 他各测量点处的相应频率分量幅值与参考幅值的比 值来表征模量电压行波幅值的衰减程度,且幅值比 越小,表明衰减越显著。

采用三维拟合不同测量点处的零模和线模电压 行波波头信号中不同频率分量幅值与参考幅值的比 值曲面,结果如图1所示。从图1中可得到与文献 [15]相同的结论:对于同一模量电压行波而言,行 波传输的距离越远,则频率分量越高的信号衰减越 明显;对于不同模量电压行波在同一位置的同一频 率分量而言,零模信号比线模信号衰减更严重。



Fig.1 Fitting surfaces for amplitude ratio of modulus signal at different measuring points

# 2 基于广域行波幅值比信息的故障定位原理

输电网分布广,输电线路距离长,在某些情况下 零模分量因衰减过甚而难以检测,且零模行波只在 发生不对称接地故障时存在。此外,对于输电网故 障定位而言,采用电流行波需要在母线的每条出线 安装行波测量设备,而采用电压行波只需要在母线 安装相应的测量设备。本文采用线模电压初始行波 波头信号的频率分量幅值信息构建故障定位判据。

# 2.1 故障线路识别判据

假设电网中共有 N 条母线,有 Q 个安装在母线 上的电压行波测量点(0 < Q < N)。根据式(1),如果 网络中任意一条母线  $B_i(i=1,2,\dots,N)$ 处发生故障, 那么任意一个测量点  $M_s(s=1,2,\dots,Q)$ 处线模电压 初始行波波头中角频率为  $\omega_k$ 的信号分量的幅值  $U_{RM}^{(1)}(\omega_k)$ 可表示为:

$$U_{B_iM_s}^{(1)}(\boldsymbol{\omega}_k) = \boldsymbol{\gamma}_{M_s} \frac{A^{(1)}}{\boldsymbol{\omega}_k} e^{-\boldsymbol{\alpha}_k^{(1)}\boldsymbol{P}_{B_i} \rightarrow M_s}$$
(2)

其中, $\gamma_{M_s}$ 为测量点  $M_s$  所在母线处的电压行波折射 系数<sup>[15]</sup>; $P_{B_i \rightarrow M_s}$ 为母线  $B_i$  到测量点  $M_s$  的最短路径, 可以由 Floyd 算法求得。此时,选择任意一个测量 点  $M_r(1 \le r \le Q)$ 处线模电压行波波头中角频率为  $\omega_k$ 的信号分量的幅值为参考值,则其余任一测量点  $M_s(s \ne r)$ 处相应信号分量的幅值与参考幅值之比  $R_M(\omega_k)$ 为:

$$R_{M_s}(\omega_k) = \frac{\gamma_{M_s}}{\gamma_{M_r}} e^{-\alpha_k^{(1)}(P_{B_i} \to M_s^{-P_{B_i} \to M_r})}$$
(3)

其中, $\gamma_{M_r}$ 为参考测量点  $M_r$  所在母线处的电压行波 折射系数; $P_{B_i \to M_r}$ 为母线  $B_i$  到参考测量点  $M_r$  的最 短路径。利用式(3)依次计算其余所有测量点的幅 值比,可得到一理论幅值比向量  $R_{B_i}(\omega_k)$ :

 $\boldsymbol{R}_{B_i}(\boldsymbol{\omega}_k) = \{ \boldsymbol{R}_{M_s}(\boldsymbol{\omega}_k) \mid s = 1, 2, \cdots, Q \perp s \neq r \} \quad (4)$ 

根据上述分析,依次假设电网中的每条母线发 生故障,基于式(3)、(4)可计算得到一理论幅值比 集合。

当实际电网检测到发生故障后,利用S变换提 取每一个测量点处线模电压初始行波波头中角频率 为 $\omega_k$ 的信号分量的幅值。记每个测量点得到的频 率分量信号的幅值为 $U_{M_s}^{(1)}(\omega_k)(s=1,2,\dots,Q),则可$  $得到一实际幅值向量<math>U_r(\omega_k)$ :

$$\boldsymbol{U}_{\rm r}(\boldsymbol{\omega}_k) = \{ U_{M_s}^{(1)}(\boldsymbol{\omega}_k) \mid s = 1, 2, \cdots, Q \}$$
(5)

根据式(1)可知,距离故障点越近的测量点得 到的频率分量信号衰减得相对较平缓,幅值相对较 大,因此向量  $U_r(\omega_k)$ 中较大的元素对应的测量点与 实际故障点较近。

选择同样的参考测量点  $M_r$ ,通过依次求取其他测量点的幅值比,可以获得一实际幅值比向量  $R_a(\omega_k)$ 如式(6)所示。

$$\boldsymbol{R}_{a}(\boldsymbol{\omega}_{k}) = \left\{ \frac{U_{M_{s}}^{(1)}(\boldsymbol{\omega}_{k})}{U_{M_{r}}^{(1)}(\boldsymbol{\omega}_{k})} \right| s = 1, 2, \cdots, Q \perp s \neq r \right\} (6)$$

定义理论幅值比向量  $R_{B_{k}}(\omega_{k})$  和实际幅值比向

68

$$\boldsymbol{D}_{\boldsymbol{R}}(\boldsymbol{\omega}_{k}) = \{ \| \boldsymbol{R}_{B_{i}}(\boldsymbol{\omega}_{k}) - \boldsymbol{R}_{a}(\boldsymbol{\omega}_{k}) \|_{2} | i = 1, 2, \cdots, N \}$$
(7)

其中, ||·||<sub>2</sub>表示求取向量的 2-范数。

由于网络中必定存在与实际故障点距离较近的 母线,假设这些母线发生故障,由式(4)所得的理论 幅值比向量中的元素与由式(6)所得的实际幅值比 向量中的元素接近,因此式(7)中较小的元素对应 的母线与实际故障点的距离相对较近。至此,选择 实际幅值向量中较大的元素和差异向量中较小的元 素,并根据拓扑连接规则(见 3.3 节),即可确定故障 区域。

假设故障区域内有 L 条线路。对于故障区域内的任意一条线路,根据测量点的配置原则(见 3.1 节),则该线路两端至少有 1 个测量点(设该测量点为  $M_a$ )。假设故障点 F 位于测量点  $M_a$  所在母线端 x 处,考虑行波最短传播路径以及母线处折射,则测量点  $M_a$  处线模电压行波波头中角频率为 $\omega_k$  的信号分量的幅值  $U_a^{(1)}(x,\omega_k)$ 和故障区域内剩余的任意 1 个测量点  $M_b$  处线模电压行波波头中角频率为 $\omega_k$  的信号分量的幅值  $U_b^{(1)}(x,\omega_k)$ 如式(8)所示。

$$\begin{cases} U_a^{(1)}(x, \boldsymbol{\omega}_k) = \boldsymbol{\gamma}_{a\_eq} \frac{A^{(1)}}{\boldsymbol{\omega}_k} e^{-\boldsymbol{\alpha}_k^{(1)} \boldsymbol{P}_{F \to M_a}(x)} \\ U_b^{(1)}(x, \boldsymbol{\omega}_k) = \boldsymbol{\gamma}_{b\_eq} \frac{A^{(1)}}{\boldsymbol{\omega}_k} e^{-\boldsymbol{\alpha}_k^{(1)} \boldsymbol{P}_{F \to M_b}(x)} \end{cases}$$
(8)

其中, $P_{F \to M_a}(x)$ 和 $P_{F \to M_b}(x)$ 分别为当虚拟故障点 F与测量点  $M_a$  间的距离为 x 时,故障点 F 到测量点  $M_a$ 和 $M_b$ 的最短路径; $\gamma_{a_{eq}}$ 和  $\gamma_{b_{eq}}$ 分别为行波传播 至测量点  $M_a$ 和 $M_b$ 的等效折射系数,其值分别为故 障点 F 到测量点  $M_a$ 和 $M_b$ 的最短路径所经过的所 有母线电压行波折射系数的乘积,表征行波传播路 径上所有母线对行波的综合折射效果<sup>[15]</sup>。

求取式(8)中  $U_a^{(1)}(x, \omega_k)$ 和  $U_b^{(1)}(x, \omega_k)$ 的比值,有:

$$R_{ab}(x, \boldsymbol{\omega}_{k}) = \frac{\gamma_{a\_eq}}{\gamma_{b\_eq}} e^{-\alpha_{k}^{(1)} [P_{F \to M_{a}}(x) - P_{F \to M_{b}}(x)]}$$
(9)

当电网检测到发生故障后,利用S变换提取测量点 $M_a$ 和 $M_b$ 处线模电压行波波头中频率相同的信号分量的幅值,并求两者比值,记为 $R_{r_{ab}}$ 。则 $R_{r_{ab}}$ 与式(9)所示 $R_{ab}(x,\omega_k)$ 的绝对差值 $d_{ab}(x,\omega_k)$ 为:

$$d_{ab}(x,\boldsymbol{\omega}_k) = |R_{ab}(x,\boldsymbol{\omega}_k) - R_{\mathbf{r}_a b}| \qquad (10)$$

从该线路首端开始,每隔 $\Delta x$ 依次设置一个虚拟 故障点,根据式(9)、(10)计算得到 $d_{ab}(x, \omega_k)$ ,则可 以得到一个差值向量 $d_{ab}(\omega_k)$ 为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{d}_{ab}(\boldsymbol{\omega}_{k}) = \{ \boldsymbol{d}_{ab}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}_{k}) \mid \boldsymbol{x} = 0, \Delta \boldsymbol{x}, 2\Delta \boldsymbol{x}, \cdots, T\Delta \boldsymbol{x} \} \\ T = \boldsymbol{Z}_{fun}(l_{ab}/\Delta \boldsymbol{x}) \end{cases}$$
(11)

其中,*l*<sub>ab</sub>为该段线路的长度;*Z*<sub>fm</sub>(·)为取实数整数 部分的函数;*T*为除去首端虚拟故障点之外的所有 虚拟故障点的总数。对于故障区域内的每条线路, 根据式(9)—(11)都可以利用虚拟故障点法计算得 到该条线路对应的差值向量。由于在故障区域内沿 线设置的虚拟故障点中一定有距离真正故障点最近 的虚拟点,因此所有差值向量元素中的最小元素所 在向量对应的线路一定为实际的故障线路。据此, 本文所提故障线路识别判据如下:

$$\min_{\boldsymbol{M},\boldsymbol{M},\boldsymbol{\sigma},\boldsymbol{\sigma}} \left\{ \boldsymbol{d}_{ab}(\boldsymbol{\omega}_k) \right\}$$
(12)

其中, Ф, 为故障区域内所有测量点的集合。

# 2.2 故障精确测距方法

根据测量点的配置原则,故障线路两端母线中 至少有一端的行波数据是可得的。在故障线路内, 假设故障点距离配置有行波测量点的母线  $B_m$  的距 离为 x,则在理论上测得的线模电压初始行波波头 中,角频率为  $\omega_k = 2\pi f_k$  的信号分量幅值与角频率为  $\omega_a = 2\pi f_a$  的信号分量幅值之比  $R_{m,ka}(x)$  为:

$$R_{m_{kq}}(x) = \frac{\gamma_{m} \frac{A^{(1)}}{\omega_{k}} e^{-\alpha_{k}^{(1)}x}}{\gamma_{m} \frac{A^{(1)}}{\omega_{q}} e^{-\alpha_{q}^{(1)}x}} = \frac{\omega_{q}}{\omega_{k}} e^{-x[\alpha_{k}^{(1)} - \alpha_{q}^{(1)}]}$$
(13)

其中, $\gamma_m$  为母线  $B_m$  处的电压行波折射系数; $\alpha_k^{(1)}$  和  $\alpha_q^{(1)}$  分别为角频率  $\omega_k$  和  $\omega_q$  下线模传播常数的实 部。 $\omega_k$  和  $\omega_q$  这 2 个角频率应选择在衰减系数-频 率曲线的中间陡峭部分<sup>[14]</sup>,本文中 2 个频率分别取 20 kHz 和 80 kHz。因为 S 变换的结果存在误差,将 其直接代入式(13) 求解故障位置会产生显著的误 差。考虑到神经网络强大的学习能力,本文采用神 经网络拟合式(13) 所示的非线性关系(具体见 3.4 节),以实现故障的精确定位。

# 3 故障定位方法的具体实现

#### 3.1 测量点的配置原则

**a.** 对于只有 1 条进线(或出线)的母线节点而 言,其必须要配置测量点;

b. 对于构成了单边线环形网络(网络中任意 2 个节点之间的线路上不存在其他节点)的母线节点 而言,若这些母线节点的总数为 W,则需要在任意 W-1个节点上配置测量点;

**c.** 对于出线数大于等于 3 的母线节点而言,其 必须配置 1 个测量点;

d. 任意1条线路至少有一端母线配置测量点。

按照上述原则配置测量点,并采用本文所提方 法确定故障线路后,可以保证故障线路的两端至少 有1个测量点。

#### 3.2 线模行波波头频率分量幅值提取

相较于实小波和复小波变换,S 变换能够更精确地提取线模行波信号波头频率分量的幅值信息<sup>[16]</sup>,但S 变换对于不同频率信号分量的提取效果不同。为了提高故障区域和线路定位的可靠性,采用不同的S 变换尺度提取初始行波波头中多个不同频率分量的幅值,并在相应的计算中采用多频率分量幅值累加的处理方式。在 PSCAD 中进行仿真,确定了 16 个合适的频率,取值范围为 20~80 kHz,分别对应采样频率 200 kHz 下 S 变换的第 9—24 尺度的中心频率。这些频率分量的衰减程度适中,能够被电网中的每个测量点捕捉到,而且较为符合理论计算。综上所述,式(5)和式(11)分别改进为:

$$\boldsymbol{U}_{r_{acc}} = \left\{ \sum_{k=1}^{16} U_{M_s}^{(1)}(\boldsymbol{\omega}_k) \middle| s = 1, 2, \cdots, Q \right\}$$
(14)  
$$\left\{ \boldsymbol{d}_{ab_{acc}} = \left\{ \sum_{k=1}^{16} d_{ab}(x, \boldsymbol{\omega}_k) \middle| x = 0, \Delta x, 2\Delta x, \cdots, T\Delta x \right\}$$
$$T = Z_{fun}(l_{ab}/\Delta x)$$

(15)

其中, $U_{r_{ace}} 和 d_{ab_{ace}} 分别为多频率累加后的实际幅 值向量和差值向量。$ 

# 3.3 确定故障域的拓扑连接规则

取式(14)中多频率累加后的实际向量 $U_{r_{ace}}$ 中最大的3个元素对应的母线 $B_{\eta_1}$ 、 $B_{\eta_2}$ 、 $B_{\eta_3}$ 和式(7)中多频率累加后的差值向量中最小的3个元素对应的母线 $B_{e_1}$ 、 $B_{e_2}$ 、 $B_{e_3}$ ,然后按照以下拓扑连接规则确定故障域线路。

**a.** 记母线  $B_{s_1}$ 、 $B_{s_2}$ 、 $B_{s_3}$ 相互连接所形成的线路 集合为  $C_1$ ,记母线  $B_{\eta_1}$ 、 $B_{\eta_2}$ 、 $B_{\eta_3}$ 相互连接形成的线路 集合为  $C_2$ ,则  $C_1$ 与  $C_2$ 的并集即为故障区域。若母 线  $B_{s_1}$ 、 $B_{s_2}$ 、 $B_{s_3}$ 中存在孤立节点(与其他任意1个节 点不直接相连),则线路集合  $C_1$ 中至多有1条线路; 同理,若母线  $B_{\eta_1}$ 、 $B_{\eta_2}$ 、 $B_{\eta_3}$ 中存在孤立节点,则线路 集合  $C_2$ 中至多有1条线路。

**b.** 若  $C_1 \ C_2$  中至少有 1 个为空集或  $C_1 \cup C_2 = \emptyset$ ,则母线  $B_{e_1} \ B_{e_2} \ B_{e_3}$ 与母线  $B_{\eta_1} \ B_{\eta_2} \ B_{\eta_3}$ 之间直接 相连(任意 2 个节点之间不存在其他节点)所构成的 区域即为故障区域。

# 3.4 神经网络拟合

径向基函数(RBF)神经网络是一种性能优良的 前馈型神经网络<sup>[17]</sup>,其具有3层网络结构,即仅有1 个隐含层<sup>[17]</sup>。其中,隐含层神经元的个数可根据经 验公式确定<sup>[15]</sup>。本文中 RBF 神经网络的结构为1× 6×1,学习速度为0.01,最大训练次数为5000,目标 函数的误差为10<sup>-5</sup>。

以 IEEE 30 节点系统中的最长线路(母线 2 和 母线 4 之间的线路,总长为 278 km)为对象,从线路

首端开始以一定的步长设置单相接地故障直至线路 末端。利用S变换计算母线节点4处线模电压初始 行波波头信号中2个特定的频率分量的幅值比,以 此建立神经网络训练所需要的样本。仿真步长选择 为0.05 km,这样一共可产生5560个训练样本。

# 4 仿真验证

为了验证本文所提方法的有效性和可靠性,在 PSCAD 中搭建 IEEE 30 节点系统,其拓扑结构如图 2 所示。根据本文测量点的配置要求,选择在母线 2—6、9—13、15、17、19、22、24—29 这 20 个节点处布 置测量点,并任意选择其中的 1 个测量点(母线 2 处 配置的测量点)为参考测量点。线路编号如图 2 所 示,其中标星处母线配置了测量点。仿真采样频率 为 200 kHz。



图 2 IEEE 30 节点系统示意图及其测量点配置 Fig.2 Schematic diagram of IEEE 30-bus system and its measurement point configuration

#### 4.1 故障类型、故障阻抗、故障初相角的影响

考虑不同的故障类型、故障阻抗以及故障初相 角的情况,在线路  $L_{18}$ 的中点处模拟各种故障,计算 结果如表 1 所示。表中, $l_d$ 为距离母线节点 10 的故 障距离; $Z_F$ 为故障阻抗; $\delta_F$ 为故障初始角; $\delta_m$ 为小故 障初始角;min( $D_R$ )为故障区域内对应线路计算得 到的幅值比差异向量中的最小值; $l_e$ 为故障精确定 位结果;e为故障定位结果的相对误差。从表 1 中可 以看出,故障类型、故障阻抗以及故障初相角对本文 所提方法的结果没有明显的影响。

### 4.2 故障位置及故障距离的影响

为了分析故障位置及故障距离对本文所提方法 的影响,在 IEEE 30 节点系统中任意 14 条线路的近端(距编号小的节点 5 km 处)、中端(线路中点)、远端(距编号较大的节点 5 km 处)模拟故障(A 相接 地故障,故障电阻为 200  $\Omega$ ,小故障初始角为 $\delta_m$ ),计 算得到相应的故障定位误差如图 3 所示。从图 3 中 可以看出,当系统中的任意线路发生故障时,本文所

				Table 1 Fault	location results under	different faul	t conditions			
d/km	故障 类型	$Z_{ m F}/\Omega$	$\delta_{ m F}/$	累加幅值向量中最大的 3个元素对应的节点	差值向量中最小的 3个元素对应的节点	故障区域 内的线路	$\min(D_R)$	定位的 故障线路	$l_{\rm e}/{ m km}$	e/%
	A 相 接地	10	$\delta_{ m m}$	17,10,13	16,6,10	$L_{18}, L_{13}$	[0.092 2,3.229 4]	L <sub>18</sub>	93.28	0.118
- 93.5 -		10	90	17,13,10	16,10,6	$L_{18}$ , $L_{13}$	[0.0897,3.3175]	$L_{18}$	93.33	0.091
		200	$\delta_{ m m}$	17,10,13	16,6,10	$L_{18}$ , $L_{13}$	[0.0927,3.2298]	L <sub>18</sub>	93.27	0.123
		200	90	17,13,10	16,10,6	$L_{18}$ , $L_{13}$	[0.089 2,3.317 1]	$L_{18}$	93.34	0.086
	AB	10	$\delta_{\mathrm{m}}$	17,10,13	16,6,10	$L_{18}$ , $L_{13}$	[0.1204,3.5731]	L <sub>18</sub>	93.38	0.064
		10	90	17,13,10	16,10,6	$\mathrm{L}_{18}$ , $\mathrm{L}_{13}$	[0.1187,3.6195]	$L_{18}$	93.41	0.048
	11回 短路	200	$\delta_{ m m}$	17,10,13	16,6,10	$L_{18}$ , $L_{13}$	[0.1217,3.5942]	L <sub>18</sub>	93.38	0.064
	<u>) 11 P</u>	200	90	17,13,10	16,10,6	$L_{18}$ , $L_{13}$	[0.113 5,3.628 7]	$L_{18}$	93.43	0.037
	1DC	10	$\delta_{ m m}$	17,10,13	16,6,10	$L_{18}, L_{13}$	[0.112 1,3.341 3]	L <sub>18</sub>	93.31	0.102
	ABC	10	00	17 13 10	16 10 6	L. L.	$\begin{bmatrix} 0 & 105 & 7 & 3 & 417 & 6 \end{bmatrix}$	I.	03 38	0.064

16,10,6

16,6,10

16,10,6





17,13,10

17,10,13

17,13,10

90

 $\delta_{\mathrm{m}}$ 

90

200

图 3 不同线路的不同位置发生故障时的定位误差

Fig.3 Fault location errors with different fault location in different lines

提方法的故障定位结果都不受影响,且有较高的故 障定位精度。

### 4.3 噪声的影响

三相

接地

60

为了验证噪声对本文所提方法的影响,在线路 L<sub>18</sub>的中点模拟故障阻抗为 200 Ω、小故障初始角为  $\delta_{\rm m}$ 的A相接地故障(故障发生时刻为0.04 s),在每 个测量点所得到的原始线模电压行波信号的中分别 加入信噪比(SNR)为40 dB、50 dB、60 dB、70 dB的 高斯白噪声。在不同噪声水平下的故障定位结果如

表2所示。由表2可以看出:在不同噪声水平下的 故障定位精度相比于噪声干扰时的定位精度有所下 降,但最大定位误差仍然不超过0.24%。

[0.1057,3.4176]

[0.117 2,3.339 4]

[0.108 4, 3.418 5]

 $L_{18}$ 

 ${\rm \overline{L}_{18}}$ 

 $L_{18}$ 

93.38

93.35

93.46

0.064

0.080

0.021

#### 4.4 线路拓扑变化的影响

 $L_{18}, L_{13}$ 

 $L_{18}, L_{13}$ 

 $L_{18}$ ,  $L_{13}$ 

为了验证线路拓扑变化对本文所提方法的影 响,使 IEEE 30 节点系统中的线路 L<sub>14</sub>以及线路 L<sub>8</sub> 退出运行,然后在线路L<sub>18</sub>上进行故障仿真。为了使 本文所提方法能够适用于这种情况,需要对所提方 法中用到的参数做如下修改:①由于线路 L<sub>44</sub>退出运 行,母线节点23变为仅有1条出线,母线节点24变 为只有2条出线,因此根据本文所述测量点的布置 原则,需要在母线节点23处增加1个行波测量点, 并取消母线 24 处的行波测量点;②当利用 Floyd 最 短路径算法时,系统拓扑连接矩阵需要做相应的调 整;③重新修正母线节点23和24的电压行波折射 系数。进行上述修改后,再利用本文所提方法进行 故障定位,计算结果如表3所示。从表3中的结果 可以看出:拓扑结构的变化对本文所提故障区域定 位和故障精确定位的结果没有任何影响。所以本文

实际故障 线路	$l_{\rm d}/{ m km}$	SNR/dB	差值向量中最小的 3个元素对应的节点	累加幅值向量中最大的 3个元素对应的节点	故障区域 内的线路	$\min(D_R)$	定位的故障 线路	e/%
L <sub>18</sub>	93.5	40	17,10,12	10,17,16	$L_{18}, L_{29}$	[0.179 3,10.852 7]	L <sub>18</sub>	0.236
		50	17,12,10	16,10,17	$L_{18}$ , $L_{29}$	[0.1167,8.2951]	$L_{18}$	0.192
		60	17,13,10	16,10,6	$L_{18}, L_{13}$	[0.097 2,3.526 9]	$L_{18}$	0.085
		70	17,10,13	16,6,10	$\mathrm{L}_{18}$ , $\mathrm{L}_{13}$	[0.093 5, 3.471 4]	$L_{18}$	0.093

表 2 不同 SNR 下的故障定位结果 Table 2 Fault location results under different SNRs

= -	W IDD T	Іп т	咱山にたてめた陸市に休用
オティ	24761		18 〒 14 1千 16 16 16 16 16 17 26 果
<b>n</b> <i>J</i>		1 - 12	

Table 3	Fault	location	results	when	$L_8$	and	$L_{34}$	are	out	of	service
					~						

实际故障 线路	实际故障 位置	$\delta_{\rm F}/(^{\circ})$	差值向量中最小的 3个元素对应的节点	累加幅值向量中最大的 3个元素对应的节点	故障区域 内的线路	$\min(\boldsymbol{D}_{\boldsymbol{R}})$	定位的故障 线路	e/%
L <sub>18</sub>	线路近端	$\delta_{ m m}$	17,10,6	16,10,6	$L_{18}$ , $L_{13}$	[0.237 2,10.393 1]	L <sub>18</sub>	0.127
		90	17,6,10	16,6,10	$L_{18}$ , $L_{13}$	[0.286 1,11.429 6]	$L_{18}$	0.121
	线路中点	$\delta_{_{ m m}}$	17,10,13	16,10,17	$\mathrm{L}_{18}$ , $\mathrm{L}_{29}$	[0.591 5,14.526 3]	$L_{18}$	0.095
		90	17,10,13	16,17,10	$L_{18}$ , $L_{29}$	[0.5723,15.1083]	$L_{18}$	0.061
	线路远端	$\delta_{ m m}$	13,16,17	16,10,17	$L_{18}$ , $L_{29}$	[0.464 7,13.337 9]	L <sub>18</sub>	0.236
		90	13,17,16	16,17,10	$L_{18}$ , $L_{29}$	[0.5106,14.6015]	$L_{18}$	0.264

所提方法能够很好地适应线路拓扑的变化。

# 5 结论

利用线模电压行波在电网中传播时波头信号中 不同频率分量幅值的衰减特征,考虑行波最短传播 路径,通过在电网中的每条母线和线路沿线设置虚 拟故障点,搜索对比实测信号分量幅值和理论信号 分量幅值比信息,实现故障线路的识别。采用S变 换提取波头信号频率分量幅值,并提出利用多个频 率分量的幅值信息累加,提升了定位算法的可靠性。 采用 RBF 神经网络拟合初始行波波头中2个不同 频率信号的幅值比与故障距离的关系,实现故障精 确定位。仿真结果验证了所提方法不受故障状况和 一定程度的噪声影响。所提方法无需全网布置测量 点和同步测量,具有较好的经济性。但是所提方法 只适用于高压电网的故障定位。之后将进一步研究 适用于低压配电网的故障定位方法。

# 参考文献:

- [1] NGU E E, RAMAR K. A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines
   [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011,33(10):1767-1775.
- [2] 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(6): 65-73.
- [3]董清,赵远,刘志刚,等.利用广域测量系统定位大电网中短路 故障点的方法[J].中国电机工程学报,2013,33(31):140-146.
   DONG Qing,ZHAO Yuan,LIU Zhigang, et al. A locating method of earth faults in large-scale power grid by using wide area measurement system[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(31): 140-146.
- [4] ESMAEILIAN A, KEZUNOVIC M. Fault location using sparse synchrophasor measurement of electromechanical-wave oscillations[J].
   IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4):1787-1796.
- [5] 程云峰,张欣然,陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究 进展[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(4):145-153.
   CHENG Yunfeng,ZHANG Xinran,LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014,42(4): 145-153.
- [6]陈羽,刘东,徐丙垠. 基于广域网络信息的行波测距算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(11):65-70.
   CHEN Yu,LIU Dong,XU Bingyin. A travelling wave location algorithm based on wide area network information [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(11):65-70.
- [7] NAMDARI F, SALEHI M. A new algorithm for wide area fault location in power system [C] // 2015 30th International Power System Conference (PSC). Tehran, Iran; IEEE, 2015; 363-370.
- [8] LI Xiaoping, HE Zhengyou, XIA Lulu. A novel fault location method using traveling wave natural frequencies for transmission grid[C]// 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Shandong,

China: IEEE, 2011, 209-212.

- [9] LI Zewen, ZENG Xiangjun, YAO Jiangang. Wide area traveling wave based power grid fault network location method [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63 (63): 173-177.
- [10] LI Zewen, HUA Huanhuan, DENG Feng. Power grid fault traveling wave network location method [C] // 2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Lake Buena Vista, FL, USA: IEEE, 2013;1-6.
- [11] CHEN Yu, LIU Dong, XU Bingyin. Wide-area traveling wave fault location system based on IEC61850 [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2):1207-1215.
- [12] RAJU F, ALEX S S. Fault direction detection and fault location identification in transmission lines using traveling waves[C] // 2015 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET). Coimbatore, India: IEEE, 2015:1-6.
- [13] 王珺,董新洲,施慎行.考虑参数依频变化特性的辐射状架空配
   电线路行波传播研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22):
   96-102.

WANG Jun, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Traveling wave transmission research for overhead lines of radial distribution power systems considering frequency characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22):96-102.

[14] 徐铭铭,肖立业,林良真. 基于零模行波衰减特性的配电线路单 相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报,2015,30(14): 397-404.

XU Mingming, XIAO Liye, LIN Liangzhen. A fault location method for the single-phase-to-earth fault in distribution system based on the attenuation characteristic of zero-mode traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 397-404.

- [15] LIANG Rui, LIU Chenglei, PENG Nan, et al. Fault location for power grid based on transient travelling wave data fusion via asynchronous voltage measurements [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 93:426-439.
- [16] 张文海,肖先勇,汪颖. 基于故障暂态信号及其衰减特征的配网 单相接地故障测距[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):46-52. ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, WANG Ying. Single-phase-toground fault location based on transient fault signal and its attenuation character for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):46-52.
- [17] 周品. 神经网络设计与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2013: 267-268.

#### 作者简介:



彭 楠(1993—),男,陕西商洛人,博 士研究生,主要研究方向为小电流接地系 统故障选线、电网故障定位、输电线路行波 保护(E-mail:996694247@qq.com);

王 政(1992—),男,山东潍坊人,硕 士研究生,主要研究方向为配电网故障定 位(E-mail:605750435@qq.com);

梁 睿(1981—),男,江苏连云港人,教授,博士,主要研 究方向为电力系统自动化、供配电安全与保护、电气设备绝 缘监测(E-mail;liangrui@cumt.edu.cn)。

# Asynchronous fault location of transmission system based on wide area amplitude ratio information of frequency components in traveling wave fronts

PENG Nan<sup>1,2</sup>, WANG Zheng<sup>1,2</sup>, LIANG Rui<sup>1,2</sup>, YANG Zhi<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Province Laboratory of Electrical and Automation Engineering for Coal Mining, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Most of the existing fault location methods of traveling wave in power network mainly rely on the arrival time and wave velocity, which require accurate synchronization. A fault location method for transmission system based on the amplitude ratio information of frequency components in the aerial-mode voltage initial traveling wave front is proposed. Based on the attenuation characteristics of frequency component amplitude in the initial traveling wave front and the shortest propagation paths of traveling wave, a fault line detection criteria based on the difference between the actual and theoretical amplitude ratio of frequency components is constructed by using the virtual fault point method. Under the premise of ensuring the training universality and fewer training samples, the nonlinear relationship between the amplitude ratio of two different frequency components in the traveling wave front and the actual fault location is fitted by using RBF(Radial Basis Function) neural network, which can realize accurate fault location. The proposed method only relies on the amplitude ratio information of lower frequency component and does not need to arrange measuring points in the whole system and synchronize accurately. The simulation model of IEEE 30-bus system is set up in PSCAD/EMTDC, and the simulative results verify the high accuracy and reliability of the proposed method.

Key words: aerial-mode traveling wave; amplitude ratio; asynchronous measurement; fault location; transmission system; RBF neural network

# Research and experimental analysis on automatic voltage regulation of 10 kV distribution transformer

SONG Kaisheng<sup>1</sup>, WANG Huafang<sup>2</sup>, MA Hongzhong<sup>1</sup>, XU Honghua<sup>2</sup>, LIU Baowen<sup>1</sup>,

WU Shuyu<sup>1</sup>, GU Shuwen<sup>1</sup>, YANG Qingfu<sup>3</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China;

3. Jiangsu Hongyuan Electric Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

**Abstract**: Aiming at the problems of complicated mechanical on-load voltage regulator device and inconvenient voltage regulation of distribution transformer, a five-speed automatic voltage regulation scheme based on power electronic switch is proposed. The start-protection circuit is used to prevent the power electronic switch from being subjected to impulse voltage and magnetizing inrush current and ensure the normal work for distribution transformer when the power electronic switch exits. Considering different wiring modes of the primary side of transformer, the distribution of voltage between two sides of switching devices and voltage between tap and ground are analyzed to provide a reference for parameter selection of power electronic switching devices. The results show that the neutral point voltage regulation mode with star connection on primary side is more conducive to the operation of power electronic devices, and the middle voltage regulation mode with delta connection on primary side has higher requirements on working voltage and isolation voltage of power electronic devices. On the basis of circuit design and device selection, an automatic on-load tap-changer based on power electronic switch is developed and installed in the field trial operation. Theoretical research, simulation analysis, prototype test and online trial operation show the feasibility and reliability of the proposed scheme.

Key words: distribution transformer; power electronic switch; automatic voltage regulation; star connection and delta connection; start-protection