

# ±800 kV 特高压直流输电线路故障定位 小波能量谱神经网络识别法

刘可真<sup>1,2</sup>, 束洪春<sup>1,2</sup>, 于继来<sup>1</sup>, 田鑫萃<sup>2</sup>, 骆道<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 固有频率与故障距离之间存在数学关系, 故障行波暂态能量在固有频率附近较集中, 其暂态能量包含丰富的故障距离信息。利用人工神经网络(ANN)的非线性函数逼近拟合能力, 建立直流输电线路故障定位的ANN模型。利用小波变换的等距特性提取单端线模电压7尺度的小波能量, 并将其作为样本属性对神经网络进行训练、测试。所提方法将不易提取的固有频率点特征转化为容易提取的频带特征, 提高了测距的可靠性。数字实验结果表明, 所提方法在不同过渡电阻和不同故障距离下均能准确测距。

**关键词:** 特高压输电; 直流输电; 固有频率; 物理边界; 小波能量谱; 人工神经网络; 故障定位

**中图分类号:** TM 77

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.024

## 0 引言

特高压直流输电线路在远距离西电东送中发挥着重要作用, 但由于线路较长, 故障几率较高。因此, 研究快速、准确的直流输电线路故障定位方法有重要意义。

目前直流输电线路故障测距主要采用识别行波波头的行波测距技术<sup>[1-5]</sup>, 分为双端法和单端法。双端行波测距法的关键是第1个行波波头不能丢失, 需要交换线路两侧的故障行波数据, 因为获得双端数据较困难, 若一侧测距装置启动失败, 则双端法失效。单端行波测距法的关键是第2个行波波头的甄别, 存在故障点反射波波头识别困难、抗干扰性差、采样率高、依赖波速度的准确估算等问题。对于直流输电线路, 由于线路两侧的平波电抗器和直流滤波器构成的物理边界会造成行波波头畸变、极性翻转, 导致正确识别和标定第2个行波波头困难。行波测距法一旦波头识别失败, 则无法准确定位故障, 其可靠性和精确性有待提高。

线路发生故障后, 故障行波在故障点和量测端来回反射, 量测端行波波头呈周期性, 其固有频率的大小随故障距离改变。文献[6-7]针对交流输电线路, 提出了利用单端行波固有频率进行故障定位的方法, 其分析了固有频率与故障距离的关系, 并推导

了固有频率的计算公式。基于固有频率的故障定位法避免了时域行波法识别波头的困难, 只需利用故障后任意一段暂态数据提取固有频率, 较识别行波波头的方法更可靠。固有频率法的测距精确性依赖于固有频率提取的精确性。文献[8]提出了一些固有频率提取和筛选的方法如快速傅里叶变换(FFT)、多信号分类(MUSIC)、Prony算法等, 但因多回并行的交流输电线路间耦合作用造成“模混杂”现象, 对固有频率的准确提取产生一定影响, 降低了测距精度。

与交流输电线路不同, 直流输电线路母线除了直流线路以外没有其他出线, 直流输电线路固有频率不会混入其频率成分, 因此, 将故障行波频谱方法用于直流输电线路故障测距更具有优势<sup>[9-10]</sup>。本文在分析直流输电线路故障行波固有频率的基础上, 从行波暂态能量的角度出发, 分析了故障行波频谱能量随固有频率和故障距离的变化, 提出在固有频率附近频谱能量较高, 直流输电线路故障行波的小波能量包含丰富的故障距离信息; 基于上述分析, 本文利用人工神经网络的非线性函数逼近拟合能力, 选取故障行波小波能量作为前馈型BP(Back Propagation)神经网络的样本属性, 对神经网络进行训练、测试后建立特高压直流输电线路故障定位的人工神经网络(ANN)模型。通过不同过渡电阻在不同故障距离的大量测距仿真结果表明, 利用所提方法实现的故障定位具有较高的可靠性和精确性, 有效地解决了行波故障测距波头识别困难和无法精确提取固有频率的问题。

## 1 特高压直流线路系统结构和控制特性

### 1.1 特高压直流线路系统结构

本文采用±800 kV云广特高压直流输电系统参数, 系统结构如图1所示。图中, 双极线路输送容量

收稿日期: 2013-05-01; 修回日期: 2014-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977039, 50847043, 90610024, 50467002, 50347026, 51267009, U1202233); 云南省自然科学基金重点资助项目(2005F0005Z, 2008ZC016M, 2010Z20); 云南省科技攻关项目(2003GG10)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (50977039, 50847043, 90610024, 50467002, 50347026, 51267009, U1202233), Yunnan Natural Science Foundation (2005F0005Z, 2008ZC016M, 2010Z20) and Science & Technology Key Projects of Yunnan Province(2003GG10)

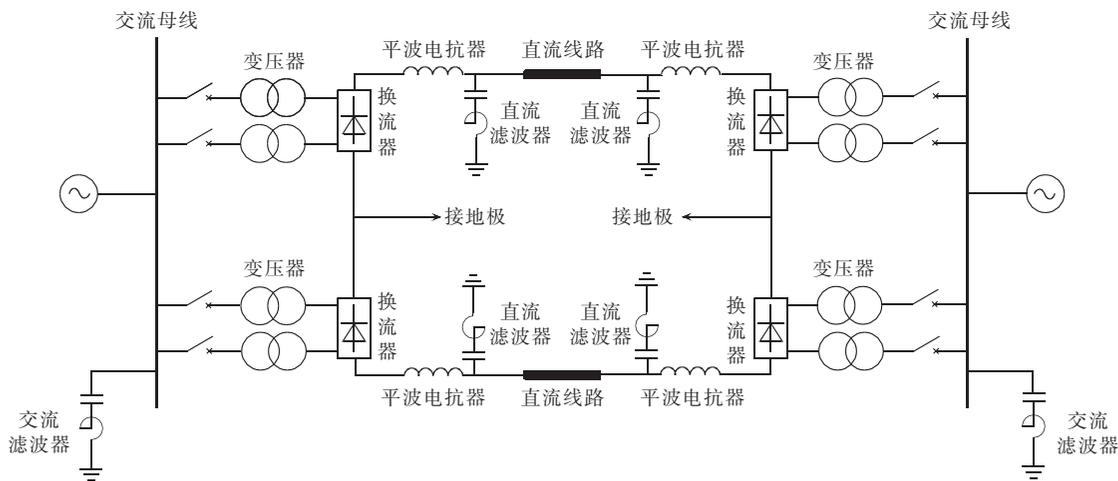


图 1 云广特高压直流输电线路系统结构  
Fig.1 Structure of Yun-Guang UHVDC system

为 5000 MW,整流侧和逆变侧的无功补偿容量分别为 3000、4000 Mvar,每极换流单元由 2 个 12 脉动换流器组成;直流滤波器为 12/24/36 三调谐滤波器;线路采用 J. Marti 频率相关线路模型,全长 1500km。

由平波电抗器和直流滤波器构成的实体物理边界见图 2。图中,  $L=400\text{ mH}$ ,  $L_1=39.09\text{ mH}$ ,  $L_2=26.06\text{ mH}$ ,  $L_3=19.545\text{ mH}$ ,  $L_4=34.75\text{ mH}$ ;  $C_1=0.9\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_2=0.9\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_3=1.8\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_4=0.675\text{ }\mu\text{F}$ ;  $B_1、B_2、B_3、B_4$  为直流滤波器避雷器,  $D_1$  为平波电抗器避雷器,  $D_2$  为直流母线避雷器。

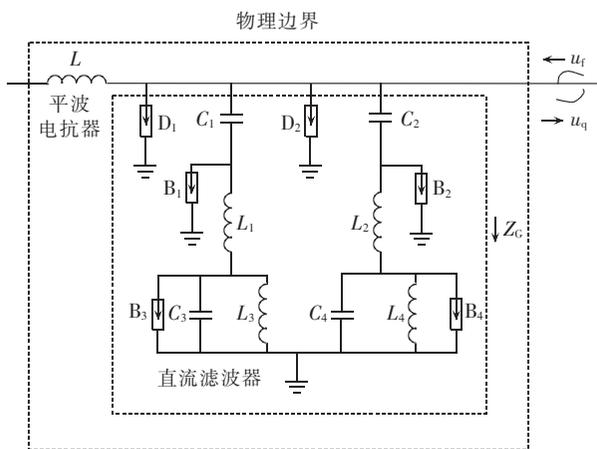


图 2 物理边界  
Fig.2 Physical boundary

根据直流滤波器的结构参数,分析其对地等值阻抗  $Z_c$  的阻抗频率特性如图 3 所示。因行波频率在几十 kHz 到几百 kHz,平波电抗器 ( $L=400\text{ mH}$ ) 的阻抗值为  $\text{k}\Omega$  级,故可视为开路。由图 3 可见:600 Hz、1200 Hz、1800 Hz 为直流滤波器的谐振频率;当频率小于 100 Hz 时,直流滤波器呈现容抗特性;当频率在 10 kHz~1 MHz 的频带范围内时,随着频率的增加,直流滤波器阻抗值线性增加,呈感抗特性,将其等效为  $L_c=0.0156\text{ H}$  的集中电感,如图 4 所示。

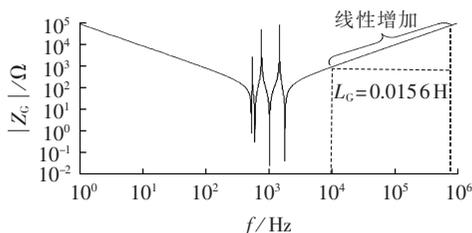


图 3 直流滤波器的阻抗频率特性  
Fig.3 Impedance-frequency characteristic of DC filter

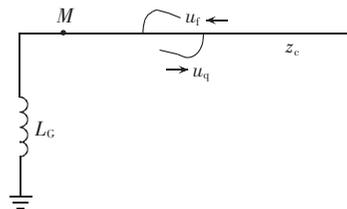


图 4 直流线路边界的等效电路  
Fig.4 Equivalent circuit of DC line boundary

与交流线路不同,直流线路电压不存在周期性过零,因而任意时刻故障,行波暂态能量都很丰富。只考虑平波电抗器时的物理边界,对行波高频呈近似开路特性,故障行波在系统侧通过物理边界反射,反射系数接近为 1。在时域上,量测端检测到的电压波呈周期性,固有频率信号明显。但同时考虑平波电抗器和直流滤波器时的物理边界,会使电压行波的固有频率发生偏移<sup>[11]</sup>,造成准确提取固有频率困难,测距精确性有待提高。

### 1.2 特高压直流线路控制特性

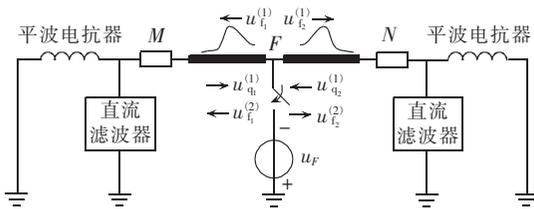
整流侧采用定电流控制和最小触发角控制,逆变侧采用定电压、定关断角控制策略,控制系统的调节是通过调节线路中的电流实现的。由于线路两侧并联电容的放电,使得故障后暂态电流过冲明显,含有丰富的频率分量,而控制系统最短响应时间不少

于 5 ms,因此在 5 ms 内控制系统不会对行波波头产生影响,不会引起固有频率的偏移和频谱能量的变化。

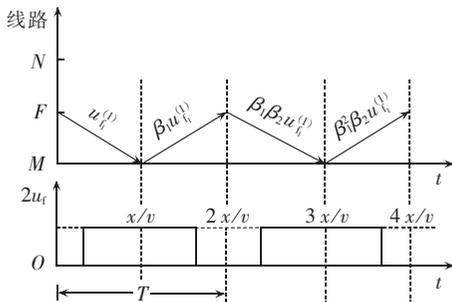
## 2 特高压直流线路故障行波频谱能量分析

### 2.1 故障行波频谱形成机理分析

线路发生故障后,由于存在直流输电线路两侧的平波电抗器和直流滤波器构成的实体物理边界,使故障行波在故障点和量测端来回反射。图 5(a)为点  $F$  发生金属性接地短路时线路的故障附加分量网络图;图 5(b)为线路电压行波网格图,图中  $T$  为故障行波频谱的振荡周期, $x$  为短路点到测量端  $M$  的距离, $v$  为波速。可见线路上的行波由不同时刻的正向行波和反射行波叠加而成,使点  $M$  量测端的行波呈周期性。



(a) 故障附加分量网络图



(b) 线路电压波形网格图

图 5 故障附加分量和电压行波网格图

Fig.5 Fault components and voltage traveling wave grid

上述分析可知,行波在故障点和线路量测端多次反射是行波固有频率形成的根本原因,固有频率的大小与故障距离和传输时延有关。故障行波的频谱反映了行波的幅频特性,故障行波固有频率成分的最低次频率幅值最大,频谱能量最高,为主频率成分,其他频率分量随频率增高而降低。其主频率  $\omega_0$  为:

$$\omega_0 = 2\pi/T \quad (1)$$

其他频率成分  $\omega_n$  与主频率之间的关系为:

$$\omega_n = n\omega_0 \quad n=2,3,4,\dots \quad (2)$$

### 2.2 直流线路固有频率与故障距离的关系

直流输电系统故障等值电路可用二端口等效电路<sup>[8]</sup>表示,如图 6 所示。图中, $u_M, u_N$  为测量端电压; $Z_L$  为平波电抗器阻抗; $Z_G$  为直流滤波器对地阻抗; $Z_c$  为线路波阻抗; $u_1, u_2$  为系统等效电压; $u_q, u_f$  分别为前行电压波和反向电压波。

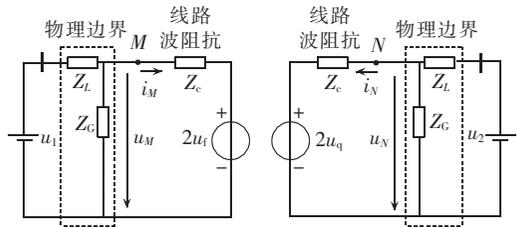


图 6 等效电路图

Fig.6 Equivalent circuit

由等效电路图得到两端测量端电压  $u_M, u_N$ :

$$u_M = \frac{Z_L // Z_G}{Z_L // Z_G + Z_c} 2u_1(t) + \frac{Z_G // Z_c}{Z_G // Z_c + Z_L} u_1(t) \quad (3)$$

$$u_N = \frac{Z_L // Z_G}{Z_L // Z_G + Z_c} 2u_q(t) + \frac{Z_G // Z_c}{Z_G // Z_c + Z_c} u_2(t) \quad (4)$$

系统固有频率的特征根满足方程式(5)<sup>[12-15]</sup>:

$$1 - p(s)\beta_1(s)p(s)\beta_2(s) = 0 \quad (5)$$

$$\beta_1(s) = \frac{Z_L(s) // Z_G(s) - Z_c}{Z_L(s) // Z_G(s) + Z_c} \quad (6)$$

$$\beta_2(s) = \frac{Z_L(s) // Z_G(s) - Z_c}{Z_L(s) // Z_G(s) + Z_c} \quad (7)$$

$$p(s) = e^{-sT}$$

其中, $\beta_1(s), \beta_2(s)$  分别为线路  $M$  侧和故障点的反射系数; $p(s)$  为 Laplace 算子。

当  $\beta_1(s), \beta_2(s)$  为实数时,式(3)为:

$$1 - \beta_1\beta_2 e^{-2(\sigma+j\omega)T} = 0 \quad (8)$$

其中, $\sigma$  为  $s$  的实部。

利用欧拉公式

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta \quad \theta = 2k\pi; k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9)$$

求解上述特征根方程,可得当线路末端存在物理边界和故障点过渡电阻不为零时,故障距离与主频率的关系为:

$$d = \frac{(\alpha + 2k\pi)v}{2\omega_0} \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (10)$$

其中, $d$  为故障距离; $\alpha$  为由物理边界和故障点过渡电阻引起的自然频率的偏移角; $v$  为行波传播速度。

由于故障电压行波固有频率的偏移角  $\alpha$  与线路故障边界和故障过渡电阻之间的关系十分复杂,较难提取精确的固有频率,降低了行波固有频率法的测距精度。

### 2.3 故障行波频谱能量与固有频率的关系

对于双极直流输电线路,当发生单极接地故障时,故障极和健全极线路之间存在耦合现象,故采用 Karenbauer 相模变换对直流线路双极电压进行解耦<sup>[16]</sup> 可得:

$$\begin{bmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} u_+(t) \\ u_-(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_+(t) \\ u_-(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $u_0, u_1$  分别为直流输电线路零模电压和线模电压; $u_+, u_-$  分别为正极线电压和负极线电压。

以故障距离为 70 km、130 km,过渡电阻为 10  $\Omega$

的单极接地故障为例,仿真得到线模电压的频谱能量如图 7 所示。从图中可以看出,故障行波固有频率随故障距离而变化,在固有频率附近行波频谱能量明显较高,能量主要集中在主频率处,在其他频率点处频谱能量较低。所以故障行波频谱能量包含了丰富的故障位置信息,可提取较直观的行波频谱能量频带特征代替固有频率点特征来进行故障测距。

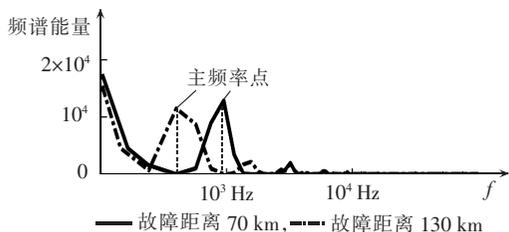


图 7 固有频率和频谱能量

Fig.7 Inherent frequency and spectrum

### 3 小波暂态能量谱故障特征提取

#### 3.1 小波分析理论

小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部化性质,能对不同的频率成分采用逐渐精细的采样步长,聚焦到信号的任意细节,这对检测高频和低频信号均有效,为输电线路故障定位提供了一种更加精细有效的分析方法<sup>[17]</sup>。

设  $\varphi(t)$  为平方可积函数,若其傅里叶变换  $\psi(\omega)$  满足可容许性条件,即:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (12)$$

则称  $\varphi(t)$  为一个基本小波,或者小波母函数。

将小波母函数  $\varphi(t)$  进行伸缩和平移,可以得到连续小波基函数  $\varphi_{a,b}(t)$ :

$$\varphi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a > 0, b \in \mathbf{R} \quad (13)$$

其中,  $a$  为伸缩因子,或称为尺度因子;  $b$  为平移因子。

对于任意的函数  $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$  ( $L^2(\mathbf{R})$  为能量有限集合,即  $\left[ \int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} < \infty$  的集合),其连续小波变换 CWT(Continuous Wavelet Transform)为:

$$W_f(b, a) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (14)$$

其中,  $\overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$  表示  $\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  的共轭。

#### 3.2 小波多分辨分析

小波多分辨分析就是将输入信号序列进行双通道滤波的过程,滤波器的输出分别对应于输入信号的低频概貌和低频细节。利用“二抽取”对每次分解后的低频部分重复进行分解,即:每一级分解把该级输

入信号分解成一个低频的粗略逼近部分和一个高频的细节部分,而且每级输出采样率都可以再减半。对采样频率为  $f_s$  的离散信号进行多尺度小波变换,则第  $j$  尺度对应的是在频带  $[f_s/2^{j+1}, f_s/2^j]$  内的信号。

#### 3.3 小波能量谱特征提取

输电线路发生故障后,故障信号的频率特性随时间变化而变化,小波变换有等距特性,故障信号的小波变换保持能量守恒,能量在时域和小波域是相等的。经小波多分辨分析可以得到分布在不同频带的故障信号,各频带信号的能量包含丰富的故障信息,可用于故障定位。

现定义某尺度下的信号小波能量为该尺度小波变换系数平方沿时间轴的积分,表达式如下:

$$E_j = \sum_{k=1}^N |W_j(k)|^2 \quad (15)$$

其中,  $E_j$  为第  $j$  层信号小波能量;  $N$  为时窗数据宽度;  $W_j(k)$  为第  $j$  层小波变换系数。则离散小波变换的小波能量谱序列为:

$$E = [E_1, E_2, \dots, E_j, \dots] \quad (16)$$

小波能量谱反映了故障信号各个尺度的能量水平,低尺度下的信号小波能量代表高频信号小波能量,而高尺度下的信号小波能量代表低频信号小波能量。

本文取采样频率  $f_s$  为 10 kHz,利用 db3 小波提取故障后 5 ms 内的故障行波线模电压小波能量。高频小波能量第 1 尺度 d1 频带(2.5 kHz, 5 kHz)、第 2 尺度 d2 频带(1.25 kHz, 2.5 kHz)、第 3 尺度 d3 频带(0.625 kHz, 1.25 kHz)、第 4 尺度 d4 频带(312.5 Hz, 625 Hz)、第 5 尺度 d5 频带(156.25 Hz, 312.5 Hz)、第 6 尺度 d6 频带(78.125 Hz, 156.25 Hz),低频小波能量的第 7 尺度 d7 频带(39.06 Hz, 78.125 Hz)。

以距线路首端点  $M$  100 km 处故障、过渡电阻为  $10 \Omega$  为例,仿真得到故障行波线模电压及小波变换 7 个尺度的能量谱如图 8 所示。

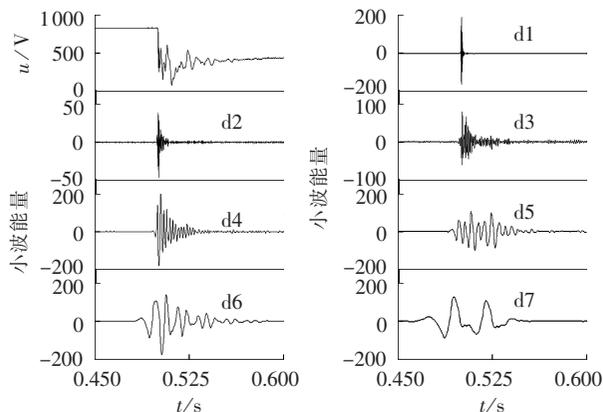


图 8 线模电压和各尺度小波能量谱

Fig.8 Line voltage modules and wavelet spectrum of different scales

## 4 基于小波能量谱的定位原理

小波暂态能量谱是描述整个时域和频域上信号的连续分布情况的,尺度越大,频带划分精度就越高,就越有利于精确地提取一定频带信号的暂态能量时谱和能量频谱。

本文选用色散较小的行波线模电压来进行故障定位。根据前面的分析,由于直流输电线路物理边界所呈现的高频阻带特性,使故障行波在故障点和量测端多次反射呈周期性,相当于在对端存在一个虚拟的量测点,故应用故障行波单端电气量测距,理论上却可以达到双端电气量测距的效果。

故障行波在主固有频率附近能量集中,将行波线模电压分量进行7尺度小波能量谱变换,在能量谱中找到能量相对集中的频带应为主固有频率所在的频带,所以线模电压各尺度的小波能量谱包含了大量的故障位置信息<sup>[18]</sup>。利用各尺度小波能量的时谱特征来查找故障位置可将外观不明显、位置不易确定的特征点转化为小波变换能量时谱中特征明显、位置可确定的另一种特征,提高了故障定位的准确度。

以过渡电阻为 $10\ \Omega$ 为例,从距离 $M$ 端 $5\ \text{km}$ 处开始设立短路故障,其后步长为 $10\ \text{km}$ ,在全线路范围内遍历正极短路L-G故障,将故障行波线模电压进行小波变换,得各尺度下的小波能量,其中第3尺度至第7尺度的小波能量分布如图9所示。

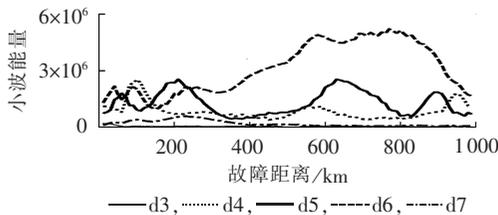


图9 故障距离和小波能量谱

Fig.9 Fault location and wavelet spectrum

由于在线路故障位置不同的条件下,其线模电压的能量谱分布规律不相同,不同故障位置的暂态行波对应的固有频率不同,对应的每个频段下的暂态能量也不同,于是可用ANN来拟合线模电压的能量谱与故障距离的对应关系。

## 5 基于小波能量谱的ANN故障测距

### 5.1 测距ANN样本属性的选取和预处理

样本的选取和预处理是神经网络模型建立的关键<sup>[19]</sup>。对于线路故障测距而言,样本数据要尽可能反映不同故障距离时的行波频谱特征,也要考虑神经网络本身的性能,可从以下方面考虑。

a. 取故障行波线模电压分层小波能量分析,由于特高压直流输电线路易发生雷击故障,在故障距离

为 $0\sim 1500\ \text{km}$ 范围内,雷击故障时第1、2尺度下的高频小波能量较普通短路故障更高,但仍远小于第3—7尺度的小波能量,而雷击故障时第3—7尺度的中低频小波能量与普通短路故障相近。为排除雷击对高频能量的影响,对雷击故障和普通短路都能够进行准确测距,故本文选取第3—7层的小波能量作为样本属性,输入矢量 $P$ 为 $[E_3, E_4, E_5, E_6, E_7]$ 。

b. 沿线路全长 $1000\ \text{km}$ 选取故障点,从距离量测端 $10\ \text{km}$ 处开始设立故障点,故障距离变化步长为 $10\ \text{km}$ 。

c. 研究表明,在同一故障点处,过渡电阻在 $10\ \Omega$ 内变化时各尺度小波能量变化小,但对于过渡电阻大于 $100\ \Omega$ 的高阻故障,一般测距的准确性也不能够保证。故本文选取过渡电阻为 $0\sim 100\ \Omega$ ,过渡电阻步长为 $10\ \Omega$ 。

按照步骤a、b进行故障仿真,得到1000组不同故障条件下的线路线模电压各尺度的小波能量,并由此构造了测距ANN的1000个样本。以第6尺度样本为例,在 $0\sim 100\ \Omega$ 不同过渡电阻和 $10\sim 1000\ \text{km}$ 不同故障距离短路故障条件下,样本的第6尺度小波能量如图10所示。

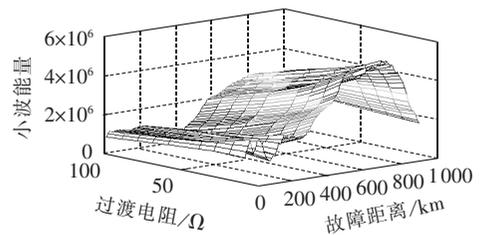


图10 第6尺度的样本小波能量

Fig.10 Wavelet energy of d6

d. 样本的归一化处理。使各输入能量幅值变化范围分布在区间 $(0, 1)$ ,网络训练时各输入量具有同等重要的地位。

### 5.2 测距ANN结构设计

BP神经网络利用非线性可微函数进行权值训练,对于任何一个在闭区间内的连续函数,都可以用BP神经网络逼近,实现任意维数的从输入到输出的非线性映射,非常适合处理需要同时考虑多种因素、条件、不精确和模糊的信息处理问题。

因此本文采用了3层BP神经网络,拓扑结构为 $5\times 40\times 1$ 。第1层为输入层;第2层为隐含层,节点个数为40,传递函数为transig;第3层为输出层,传递函数为trainlm。利用MATLAB的神经网络工具箱创建了BP神经网络,其结构如图11所示。

### 5.3 测距ANN的训练和测试

从1000个输入样本中随机选取800个训练样本、200个测试样本。将随机选取的训练样本代入

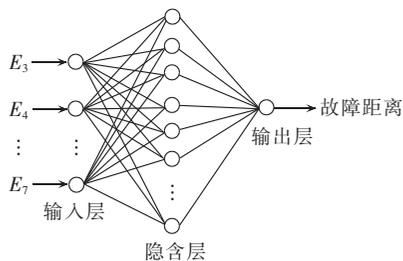


图 11 测距 ANN 结构

Fig.11 Structure of fault locating ANN

MATLAB 创建的 BP 神经网络中进行训练,训练算法选用自适应学习速度算法,最大训练次数为 10000 次,目标函数误差设定为  $10^{-5}$ 。训练的收敛曲线如图 12 所示,经过 950 次训练后 ANN 收敛到预期误差要求。取测试样本对训练后的 ANN 进行验证,得到故障测距网络,将故障数据输入训练后的故障测距网络即可实现故障测距。

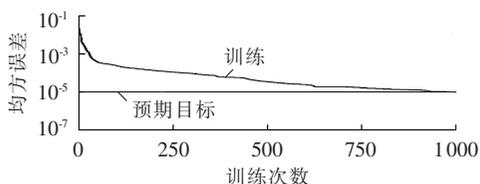


图 12 BP 神经网络收敛曲线

Fig.12 Convergence curve of BP neural network

## 6 数字实验

本文利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件构建特高压直流输电线路电磁暂态仿真模型<sup>[11,20]</sup>,对线路进行仿真,仿真时间长度为 5 ms,采样频率为 10 kHz。对不同过渡电阻和不同故障距离条件下的测距结果如表 1 所示。

表 1 测距结果  
Tab.1 Result of fault location

过渡电阻/ $\Omega$	故障距离/km		误差/km
	实际值	估算值	
11	22	22.12	+0.12
45	49	50.49	+1.49
22	69	68.62	-0.38
13	96	96.83	+0.83
31	125	126.10	+1.10
67	177	179.60	+2.60
5	256	254.60	-1.40
77	477	478.70	+1.70
9	623	623.00	0
20	712	711.80	-0.20
75	809	807.60	-1.40

避开所例样本集,取正极短路 L-G 故障过渡电阻分别为 14  $\Omega$ 、32  $\Omega$ 、62  $\Omega$ ,从距离 M 端 5 km 开始设置故障,其后步长为 10 km。在全线路范围内遍历上述 3 种过渡电阻的正极短路 L-G 故障,通过仿真,求得对应的故障测距的绝对误差曲线如图 13 所示。

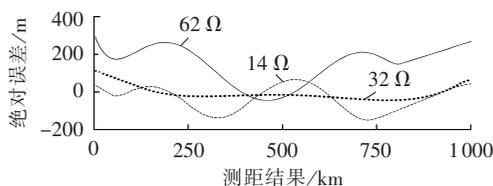


图 13 故障测距数字试验结果

Fig.13 Results of digital test

从图 13 看出,故障距离在 0~1000 km 范围内时,低阻和 100  $\Omega$  内的高阻故障情况下的测距结果误差均在 1 km 内,表明本文的测距算法具有较高的可靠性和准确性。虽然小波能量和神经网络相结合的方法会造成计算量的增加,算法速度会变慢,但从目前计算机的运算速度来看,神经网络测距的计算时间仍为毫秒级,而故障测距也并不要求像行波暂态保护一样具有速动性,故神经网络对测距计算量和算法速度并不影响测距算法的实用性。

## 7 结论

利用特高压直流输电线路物理边界所表现的高频阻带特性以及固有频率的物理本质构造  $\pm 800$  kV 直流输电系统故障测距的 ANN 方法,具有以下特点。

a. 直流输电系统与交流输电系统不同,直流母线上除直流线路之外无其他出线,直流输电线路故障时,电压行波固有频率就是本线路的固有频率,而无其他线路的影响。

b. 应用固有频率是反映短路点故障行波反射和传输距离的量度,故障行波频谱在固有频率附近能量集中的特点,以及高压直流线路物理边界所呈现的高频阻带特性,使单端电气量测距达到双端电气量测距的效果,采样率要求低,较行波测距的可靠性高。

c. 将外观不明显、位置不易精确确定的固有频率特征点转化为利用另一种外观明显、位置易确定的小波能量频带特征来查找故障位置,提高了故障定位的准确度。利用神经网络非线性拟合能力,进行特高压直流输电线路接地故障测距,其样本属性清晰,样本集规模小,收敛效率高。

## 参考文献:

- [1] MURTHY P K, AMARNATH J, KAMAKSHIAH S, et al. Wavelet transform approach for detection and location of faults in HVDC system[C]//Industrial and Information Systems. Kharagpur, India: IEEE, 2008: 1-6.
- [2] 甄威, 陈卫, 陈平, 等. 输电线路行波仿真方法及行波试验技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 74-79.  
ZHEN Wei, CHEN Wei, CHEN Ping, et al. Simulation method and test technology of transmission line traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 74-79.
- [3] 刘永浩, 蔡泽祥, 徐敏, 等. 基于波速优化与模量传输时间差的直流

- 线路单端行波测距新算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):72-76.
- LIU Yonghao,CAI Zexiang,XU Min,et al. Single-end fault location algorithm based on traveling wave speed optimization and modal propagation time difference for DC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):72-76.
- [4] 张峰,梁军,车仁飞,等. 基于行波理论的先进故障测距系统实现算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):54-59.
- ZHANG Feng,LIANG Jun,CHE Renfei,et al. Advanced algorithm of fault location system based on traveling wave theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):54-59.
- [5] 束洪春,王超,张杰,等. 基于形态学的 HVDC 线路故障识别与定位方法研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):6-9,18.
- SHU Hongchun,WANG Chao,ZHANG Jie,et al. HVDC transmission system fault identification and locating algorithm using mathematical morphology[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(4):6-9,18.
- [6] 邬林勇,何正友,钱清泉. 单端行波故障测距的行波方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):99-104.
- WU Linyong,HE Zhengyou,QIAN Qingquan. A frequency domain approach to single-ended traveling wave fault location[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(25):99-104.
- [7] 邬林勇,何正友,钱清泉. 一种提取行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):69-75.
- WU Linyong,HE Zhengyou,QIAN Qingquan. A single ended fault location method using traveling wave natural frequency[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(10):69-75.
- [8] 邬林勇. 利用故障行波固有频率的单端行波故障测距法[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- WU Linyong. A single ended fault location method using travelling wave natural frequencies[D]. Chengdu:Southeast Jiaotong Universities,2008.
- [9] 束洪春,张敏,张广斌,等. ±800 kV 直流输电线路单端行波故障定位的红绿色彩模式检测[J]. 电工技术学报,2010,25(11):155-163.
- SHU Hongchun,ZHANG Min,ZHANG Guangbin,et al. A RC color pattern detection of single-ended traveling wave fault location on ±800 kV UHVDC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(11):155-163.
- [10] 蔡新雷,宋国兵,高淑萍,等. 利用电流固有频率的 VSC-HVDC 直流输电线路故障定位[J]. 中国电机工程学报,2011,31(28):112-119.
- CAI Xinlei,SONG Guobing,GAO Shuping,et al. A novel fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(28):112-119.
- [11] 束洪春,田鑫萃,张广斌,等. ±800 kV 直流输电线路故障定位的单端自然频率法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):104-111.
- SHU Hongchun,TIAN Xincui,ZHANG Guangbin,et al. Fault location for ±800 kV HVDC transmission lines using natural frequency of single terminal voltage data[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):104-111.
- [12] MACÍAS J A R,EXPÓSITO A G,SOLER A B. A comparison of technique for state space transient analysis of transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):894-903.
- [13] HUANG S F,WANG X G. A fault location scheme based on spectrum characteristic of fault-generated high-frequency transient signals[C]//Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB,Canada:IEEE,2009:1-5.
- [14] 李晓晨,李天云,陈昌雷. 基于固有模态能量熵和支持向量机的输电线路故障选相新方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):104-108.
- LI Xiaochen,LI Tianyun,CHEN Changlei. Faulty phase selection of transmission lines based on intrinsic mode energy entropy and SVM[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):104-108.
- [15] 黄少锋,王兴国,刘千宽. 一种基于固有频率的长距离输电线路保护方案[J]. 电力系统自动化,2008,32(8):59-63.
- HUANG Shaofeng,WANG Xingguo,LIU Qiankuan. Natural frequency based protection scheme for long distance transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(8):59-63.
- [16] 吴维韩,张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京:科学出版社,1989:50-53.
- [17] 束洪春. 电力工程信号处理及应用[M]. 北京:科学出版社,2009:217-223.
- [18] 曾祥君,张小丽,马洪江,等. 基于小波能量谱的电网故障行波定位方法[J]. 高电压技术,2008,34(11):2311-2316.
- ZENG Xiangjun,ZHANG Xiaoli,MA Hongjiang,et al. Traveling wave fault location method for power grids based on wavelet packet energy spectra[J]. High Voltage Engineering,2008,34(11):2311-2316.
- [19] 张得丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2009:92-104.
- [20] 刘可真,束洪春,孙士云,等. ±800 kV 云广特高压直流控制方式的动态特性分析[J]. 高电压技术,2010,36(1):190-195.
- LIU Kezhen,SHU Hongchun,SUN Shiyun,et al. Analysis on dynamic characteristics of control mode for ±800 kV Yun-Guang UHVDC[J]. High Voltage Engineering,2010,36(1):190-195.

#### 作者简介:



刘可真

刘可真(1974-),女,云南大理人,副教授,博士研究生,主要研究方向为特高压直流输电的保护与控制、故障测距(E-mail:liukzh@foxmail.com);

束洪春(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及 DSP 应用等方面的教研工作(E-mail:kmshe@sina.com);

于继来(1965-),男,江苏扬州人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统分析与优化、电力市场等方面的教研工作;

田鑫萃(1986-),女,云南保山人,博士研究生,研究方向为新型继电保护与故障测距;

骆道(1988-),男,云南楚雄人,硕士研究生,研究方向为新型继电保护与故障测距。

(下转第 154 页 continued on page 154)

[18] 李岩,黄立滨,洪潮,等.  $\pm 800$  kV 直流输电系统双 12 脉动阀组投退策略分析[J]. 南方电网技术,2010,4(2):21-25.

LI Yan,HUANG Libin,HONG Chao,et al. Analysis on the strategy of block/deblock dual 12-pulse valve groups in  $\pm 800$  kV DC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2010,4(2):21-25.

[19] 张尧,房宣合,胡烈良,等. 特高压直流输电系统阀组投退策略[J]. 高电压技术,2010,36(8):1858-1864.

ZHANG Yao,FANG Xuanhe,HU Lieliang,et al. Blocking and deblocking strategies of valve group for UHVDC power trans-

mission[J]. High Voltage Engineering,2010,36(8):1858-1864.

#### 作者简介:



黎东祥

黎东祥(1989-),男,福建上杭人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电(E-mail:ldxfjsh@163.com);

王渝红(1971-),女,重庆人,教授,博士,通讯作者,主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电(E-mail:yuhongwang@scu.edu.com)。

## Blocking and deblocking strategy of single UHVDC converter group under joint control mode of dual 12-pulse converter groups

LI Dongxiang<sup>1</sup>,WANG Yuhong<sup>1</sup>,DING Lijie<sup>2</sup>,LI Xingyuan<sup>1</sup>,DAI Hanguang<sup>1</sup>,SU Guoliang<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China;

2. Sichuan Electric Power Research Institute,Chengdu 610072,China)

**Abstract:** The blocking and deblocking strategy of single converter group under the joint control mode of dual 12-pulse converter groups is studied with PSCAD/EMTDC for UHVDC power transmission system. The sequential control and timing coordination of firing angle,ignition pulse,bypass switch,bypass pair and online controller parameter adjustment are analyzed. Simulative results show that,the deblocking of single converter group should adopt small firing angle under the joint control mode of dual 12-pulse converter groups and the rate limiter and value limiter should be added in series after the firing angle limiter is disabled to improve the dynamic performance of DC operating parameters during the deblocking;while during its blocking,the firing angle should be adjusted to  $90^\circ$  at a certain rate and the bypass pair should be put into operation to speed up the blocking process. Case studies show that the proposed strategy meets the requirements of UHVDC single converter group blocking and deblocking operations.

**Key words:** UHV power transmission; DC power transmission; joint control; 12-pulse converter groups; control

(上接第 147 页 continued from page 147)

## Fault location based on wavelet energy spectrum and neural network for $\pm 800$ kV UHVDC transmission line

LIU Kezhen<sup>1,2</sup>,SHU Hongchun<sup>1,2</sup>,YU Jilai<sup>1</sup>,TIAN Xincui<sup>2</sup>,LUO Xiao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation,Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China;

2. Faculty of Electric Power Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650051,China)

**Abstract:** The inherent frequency of fault traveling wave is mathematically associated with fault distance and its transient energy containing rich information about fault distance is concentrated around this frequency. Because of its fitting capability for non-linear function,an ANN(Artificial Neural Network) model of HVDC line is built to locate its faults. Based on the equidistant characteristic of wavelet transform,the transient energy spectrum of line voltage modulus at one end is extracted in seven scales,which are used as the samples to train and test the ANN model. The proposed method takes the inherent frequency band,instead of point,to extract fault information,which is easier and more reliable. Results of digital test show faults at any line position and with any transition resistance can be accurately located.

**Key words:** UHV power transmission; DC power transmission; inherent natural frequency; physical boundary; wavelet energy spectrum; artificial neural network; electric fault location