

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.010

利用动力学原理研究行波信号

李 毅^{1,2}, 吴政球¹, 李建奇³

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 国网张家界供电公司, 湖南 张家界 427000;
3. 湖南城市学院, 湖南 益阳 410004)

摘要: 针对行波在电网传输过程中存在畸变现象, 文中以某110 kV电网(共计15个变电站节点)为例, 对行波传播过程进行了仿真, 分析了行波到达时间与传播路径的关系, 及各站点行波信号的时频域特性。利用EMD-HHT算法计算得到行波的到达时间, 利用动力学理论计算了行波头前0.5 ms(共计1 000个样点)波形的Kolmogorov熵及分维数 F , 研究发现: 行波信号的 K 熵及分维数 F 随传播距离增加, 呈减少趋势, 且邻近线路或环网节点的指数分布数值相近, 该结论可定性判断行波源的大致位置。

关键词: 行波; 畸变; 传播; 动力学

Study on Traveling Wave Signal Based on Dynamic Principle

LI Yi^{1,2}, WU Zhengqiu¹, LI Jianqi³

(1. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. State Grid Zhangjiajie Power Supply Company, Hunan Zhangjiajie 427000, China; 3. Hunan City University, Hunan Yiyang 410004, China)

Abstract: Aiming at the distortion phenomenon during the travelling wave transmission in power system, one 110 kV power grid (a total of 15 substations node) is built to simulate the travelling wave propagation in this paper, the relationship between the traveling wave arrival time and propagation path, the site traveling wave signal time-frequency domain characteristics are analyzed. EMD-HHT algorithm is used to calculate the arrival time of traveling wave, Kolmogorov entropy and fractal dimension F for the first 0.5 ms wave of the traveling wave (a total of 1 000 samples) are calculated by using dynamics theory. The paper concludes that, values of K and F of traveling wave take on decreasing trend with the propagation distance increases, and the index distribution value for adjacent lines or ring network node is similar, so this conclusion can be applied to qualitatively distinguish the roughly position of the traveling wave source.

Key words: traveling wave; distortion; transmission; dynamics

0 引言

电网暂态行波包含丰富的故障信息, 是一个突变的、具有奇异性的信号。其持续时间短、传播途中易于衰减, 因而难以精确检测。国内外不少学者对其进行了深入研究, 文[1-2]分析了行波信号在电网的传播特性, 利用行波作为故障测距的手段; 文[3-5]采用小波分析方法来提取故障行波波头, 以提高行波头到达时刻的检测精度, 但小波分

析受小波基的种类、采样率及分解尺度等因素的影响, 难以获得满意的检测效果, 并且小波分析本质上是可调的窗口 Fourier 变换, 一旦选择了小波基和分解尺度, 所得到的结果是某一固定频率段的信号, 这一频率段只与信号的采样频率有关, 而与信号本身无关, 从这一点上来说, 小波分析不具有自适应性。文[6-10]利用经验模分解将行波信号分解为若干个模量后, 提取具有波头奇异信息的分量作 Hilbert-Huang 变换, 实践证明具有较小波分析更高的检测精度。笔者在此基础上, 研究了某

收稿日期: 2016-01-09; 修回日期: 2016-03-26

基金项目: 湖南省科技计划项目(2011FJ3195、S2012GK2014)资助。

Project Supported by Hunan Science and Technology Program(2011FJ3195, S2012GK2014).

110 kV 电网行波传输特性,从时频域角度入手,利用 EMD-HHT 及动力学理论分析了行波在电网中的波形特征及传播特性,并得出行波传输的基本规律。

1 电网行波的特性分析

1.1 距离及路径对行波的影响

某 110 kV 电网行波传播结构图见图 1,除行波源节点 P 外,图 1 中共有 14 个行波接收节点,每个节点代表一个变电站。其中节点⑩为电厂,其他节点均为变电站;线路(⑤→⑦)为双回线路,其他线路为单回线路;ATP 仿真采样频率 2 MHz,时长 1.0 ms。

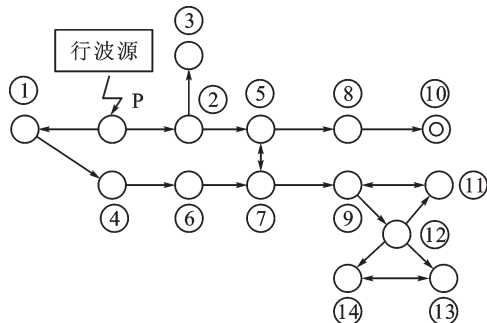


图 1 某 110 kV 电网行波传播结构图

Fig. 1 One 110 kV power grid traveling wave transmission structure

各节点检测到的电流行波信号 ($X_1 \rightarrow X_{14}$) 见图 2,按行波到达时间的先后次序排序,依次为:1-2-4-6-3-5-7-8-10-9-11-12-13-14,线路长度及行波传输路径有关参数见表 1。

各节点距离行波源最短距离见表 2,对表 2 分析,发现行波到达各站点的先后次序与其距离行波源(P 节点)距离相关,表 2 第 3 列为各节点距离 P 点最短路径长度,表 2 第 5 列为行波到达时间。尽管节点 4 较节点 2 更靠近 P 点,但仿真发现行波先到达节点 2,原因为,行波从 P→④途径 4 个阻波器,而从 P→②仅经过 2 个阻波器。表明阻波器对电流行波具有衰减、延迟的作用。

为研究距离对于行波信号的影响,图 3 按距离从小到大的排列次序,分别对各节点行波信号进行 FFT 分析,发现随着距离增加,行波信号的频谱幅值逐渐衰减,其高频分量衰减的尤其显著^[1-2]。

1.2 阻波器对行波的影响

1.2.1 阻波器对电流行波的影响

阻波器对行波的影响见图 4,以节点 1(110 kV 叶子冲变)某出线为例,分别采集线路阻波器内外两侧电流行波信号,并进行分析,行波波形见图 5,比较发现,电流行波在经由线路阻波器从站外向站内传输过程中,阻波器对电流信号具有信号延迟和衰

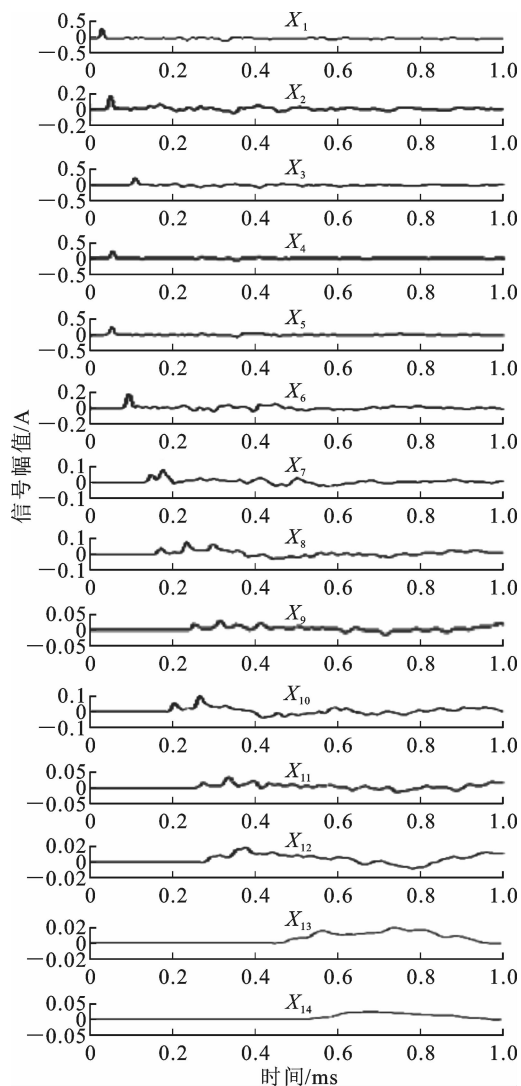


图 2 各站点检测到的行波信号

Fig. 2 Traveling wave signal detected on each site

表 1 电网线路长度

Table 1 Length for each grid line

线路	长度/km	线路	长度/km
P→①	6.760	⑤→⑨	32.849
P→②	12.700	⑧→⑩	7.639
②→③	14.969	⑨→⑪	4.079
①→④	5.534	⑨→⑫	9.480
④→⑥	10.000	⑪→⑫	10.000
⑥→⑦	20.000	⑫→⑬	50.860
⑤→⑦(双回)	2.930	⑫→⑭	68.173
⑤→⑧	10.015	⑬→⑭	29.130

减高频分量的作用^[3-4]。为分析信号频谱变化,对两侧的电流行波进行 FFT(傅里叶变换)、STFT(短时傅里叶变换),分别见图 6、7。

通过对站内外侧电流行波做 FFT 及 STFT 变换,如图 6、7 所示,发现行波信号频谱主要集中在

表 2 各节点距离行波源最短距离

Table 2 The shortest distance between traveling wave source and each node

节点	最短传输路径	距离/km	途经阻波器个数	时域检测到达时间/ms
1	P-1	6.760	1×2	0.023
4	P-1-4	12.294	2×2	0.048
2	P-2	12.700	1×2	0.047
6	P-1-4-6	22.294	3×2	0.085
3	P-2-3	27.669	2×2	0.113
5	P-2-5	33.629	2×2	0.126
7	P-2-5-7	36.559	3×2	0.136
8	P-2-5-8	43.644	3×2	0.169
10	P-2-5-8-10	51.283	4×2	0.197
9	P-2-5-9	66.478	3×2	0.241
11	P-2-5-9-11	70.557	4×2	0.262
12	P-2-5-9-12	75.958	4×2	0.278
13	P-2-5-9-12-13	126.818	5×2	0.483
14	P-2-5-9-12-14	144.131	5×2	0.537

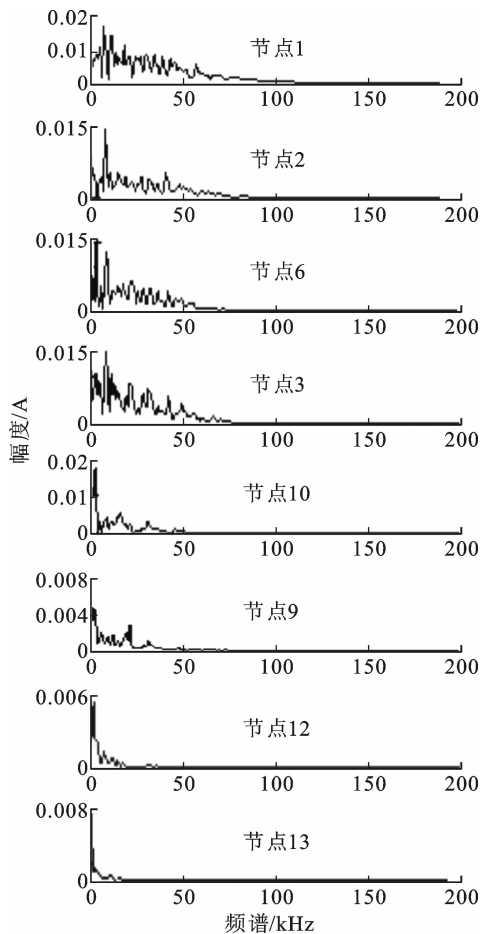


图 3 各节点行波信号的频谱比较

Fig. 3 Comparison of each node traveling wave signal spectrum

0~100 kHz 范围, 当行波经由阻波器从线路传到变电站内侧后, 部分高频分量被抑制, 波头变的平滑,

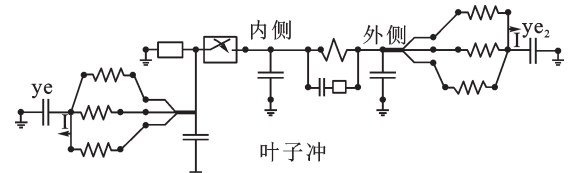


图 4 阻波器对行波的影响

Fig. 4 Effect of wave device on traveling wave

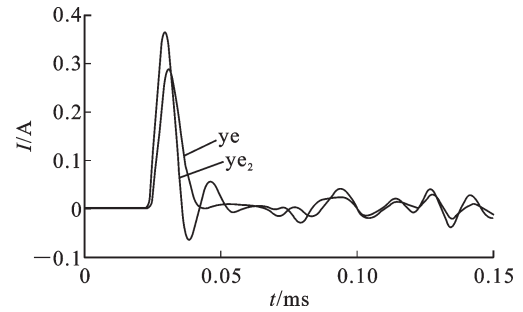


图 5 站内外电流行波信号波头比较

Fig. 5 Comparison of traveling wave head for inside and outside substation

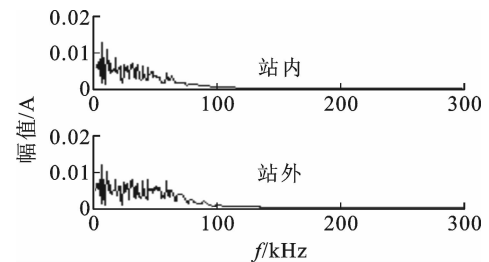


图 6 站内外电流行波频谱比较

Fig. 6 Comparison of traveling wave spectrum for inside and outside substation

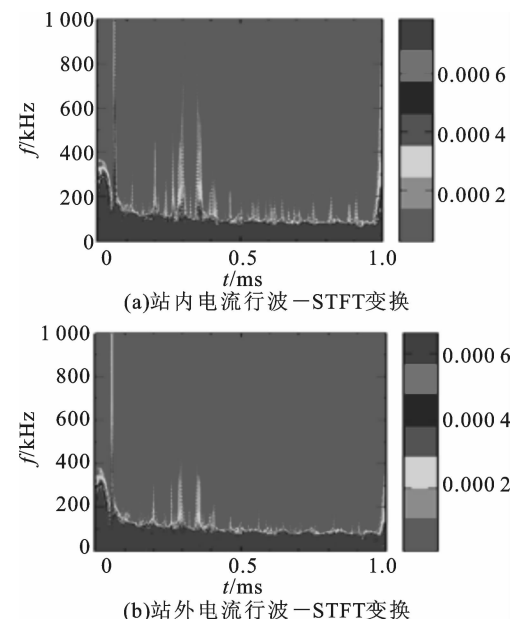


图 7 站内外电流行波 STFT 比较

Fig. 7 Comparison of traveling wave STFT spectrum for inside and outside substation

幅值衰减。

1.2.2 阻波器对电压行波的影响

在仿真图4中阻波器内外侧分别采集电压行波信号。采集的电压行波信号及频谱图见图8。通过时-频域比较分析,发现阻波器对电压行波传输影响不大。

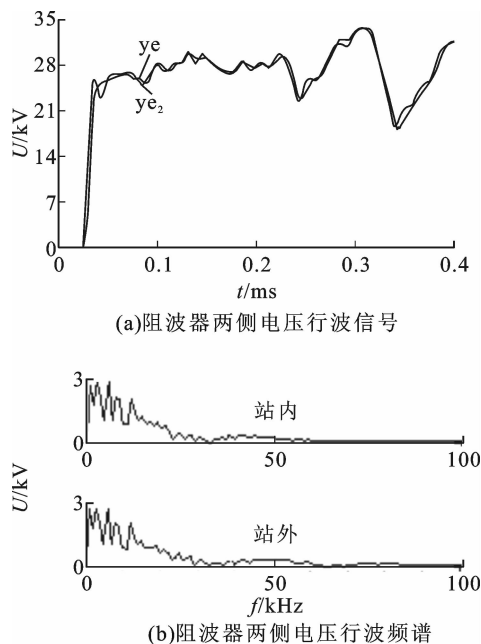


图8 阻波器两侧电压行波时频特征比较

Fig. 8 Comparison of voltage traveling wave time-frequency characteristics

1.2.3 阻波器对行波信号动力学特征指数的影响

动力学理论^[11]提出分维数 F 及Kolmogorov熵(K 熵)两个特征指数,其中,分维数 F 反映了复杂形体占有空间的有效性,是复杂形体不规则性的量度。Kolmogorov熵定义为系统动态过程信息的平均损失率。Kolmogorov Exponent(KE 熵)反映了系统的无序程度。若系统呈现混沌特性,则 KE 大于零;当 $KE=0$ 时,表示该信号是一个有序时间序列;当 $KE=\infty$ 时,说明该信号是一个完全随机序列; KE 值越大,该信号的随机程度越高。阻波器两侧行波信号的动力学指数见表3。

表3 阻波器两侧行波信号的动力学指数

Table 3 Traveling wave signal dynamic index on both sides of resistance filter

行波	指数	内侧	外侧
电流行波	K 熵($\times 10^{-4}$)	0.534 11	2.021 00
	分维数 F	1.225 50	1.356 70
电压行波	K 熵($\times 10^{-4}$)	1.093 00	1.104 30
	分维数 F	2.069 20	2.079 70

通过计算阻波器两侧行波信号的动力学指数,发现无论是电流行波还是电压行波在经由阻波器之后,其分维数 F 和 K 熵均下降,其中电流行波变

化显著,主要原因是,阻波器对行波信号中的高频分量具有较强的过滤和抑制作用。由于高频分量是识别行波头的主要依据,因此通常优先选用提取电压行波作为分析。

2 EMD-HHT分析行波在电网中的传输

研究表明,对行波信号进行经验模分解(EMD)能很好地提取行波的特征信息^[6-8],再利用Hilbert-Huang (HHT)对EMD分解后的第1层高频信息 IFM_1 做黄变换,就能精确地检测到行波到达的确切时间,由此可见, IFM_1 分量中蕴含着行波到达节点的关键信息,因此,文中利用动力学理论及 IFM_1 能量值对 IFM_1 分量着重分析。

对节点1行波信号进行的EMD分解见图9,共分解7层,第7层为剩余分量 res ,取分量 IFM_1 进行分析^[9-10,12-13]。

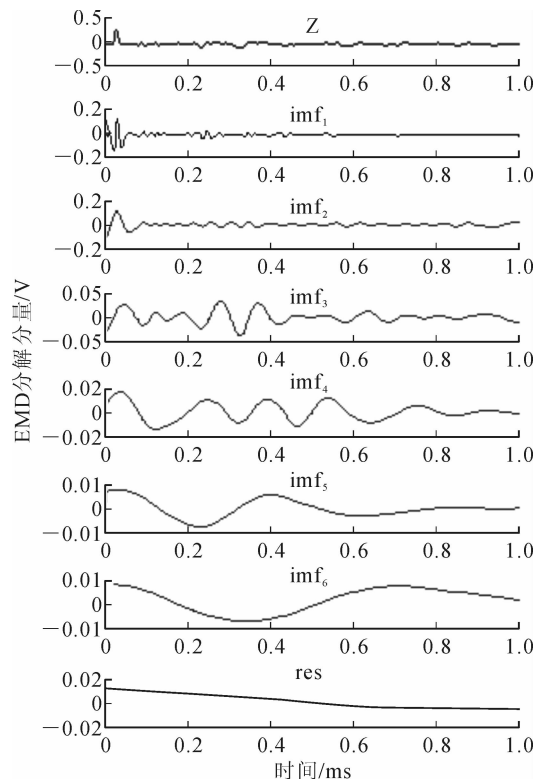


图9 节点1行波信号的EMD分解

Fig. 9 Traveling wave signal EMD decomposition for node 1

设信号 $x(i)(i=1,2,\dots,n)$ 经归一化处理后得到的信号记为 $X(i)$ 。信号 $x(i)$ 的能量值 e 根据式(1)计算得到

$$e = \sqrt{\sum_{i=1}^n |X|^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x(i)}{\max(|x|)} \right|^2} \quad (1)$$

各节点行波信号的EMD分解见图10。将图10中(1-14节点)行波信号 X_1-X_{14} 经EMD分解,得到的第1层模量 IFM_1 分别代入式(1),计算得到各节点的能量值。同时,利用动力学理论对图2中各节点

采集到的行波信号^[14-19](注:取行波头前0.5 ms, 共计1 000个样点作计算)求取动力学特征指数(K 熵、分维数 F)。各节点的行波特征指数见表4。

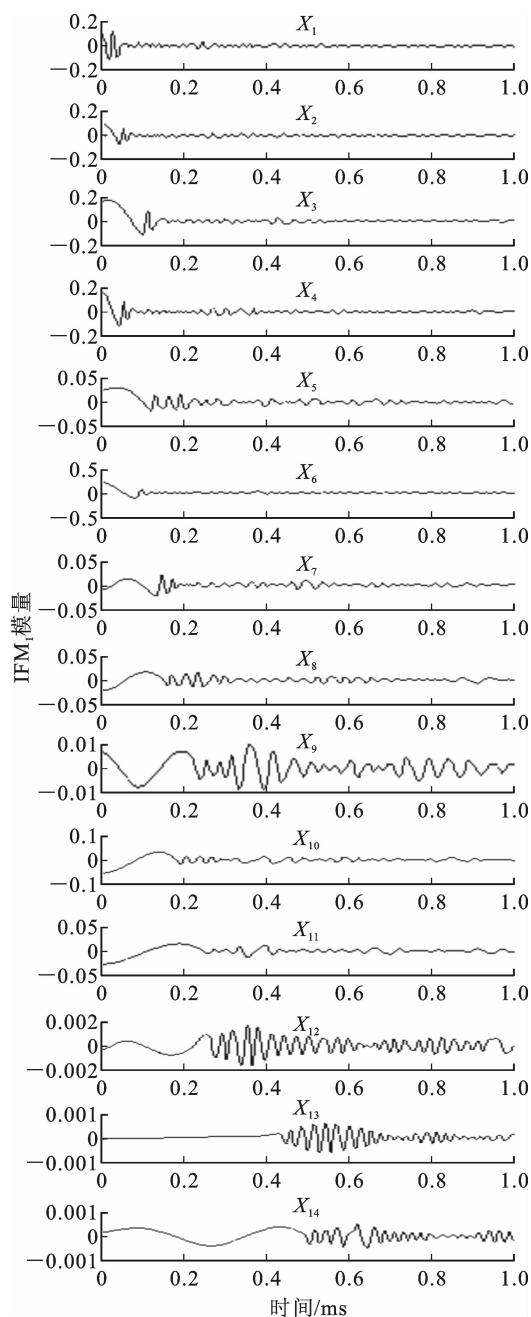


图10 各节点行波信号的 EMD 分解

Fig. 10 Traveling wave signal EMD decomposition for each node

分维数、 K 熵、能量值与距离的关系见图11。图11根据行波到达的先后次序依次描绘了“距离—分维数”、“距离— K 熵”、“距离—能量值”的关系曲线。可见:行波信号波头的分维数 F 及 K 熵随传播路径的增加,其大小总体呈减少变化趋势;而行波信号经过 EMD 分解得到的第1层模量信号 IMF₁ 的能量值总体呈增加变化趋势^[20-21]。

根据行波到达的先后次序,给出了“能量— K 熵—分维数”三者之间的对应关系,见图12。研究表明,行波优先到达的节点其分维数和 K 熵较大,而能作为识别行波到达时间的模分量(IMF₁)其有效能量值却恰恰较小,主要原因是优先到达的行波信号 EMD 分解层数较多,导致其 IMF₁ 分量幅值较小,因此通过计算得到的能量值就相对较小。通过观察图10中的3个不同区域,分析表明,同一邻近线路或邻近环网节点的动力学特征指数相近,且位于邻近区域内,该规律可作为判别行波源位置的参考依据。

3 结语

文中分析了行波波形特征及传播规律,分析了行波到达时间与传播路径之间的关系及行波信号的时频域特性。提出利用 EMD-HHT 计算行波的到达时间,利用动力学理论得出行波波形的非线性特征指数,研究得出:行波信号的 K 熵及分维数 F 随传播距离增加,呈减少趋势;行波信号经 EMD 分解后第1模量的能量值随距离增加而增加;三维点 $P(e, K, F)$ 具有分布规律,即总沿邻近线路节点或邻近环网节点分布,该结论可应用于识别行波源的位置。

参考文献:

- [1] 陈平,葛耀中,索南加乐,等. 输电线路故障开断暂态行波的传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 76-79.
CHEN Ping, GE Yaozhong, SUONAN Jiale, et al. Study on propagation characteristics of fault switching-off induced transient travelling waves on transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 76-79.
- [2] 徐丙垠. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术[D]. 西安: 西安交通大学, 1991.
XU Bingyin. Using transient travelling wave to research the transmission line fault location technology [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1991.
- [3] 覃剑,陈祥训,郑健超,等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 7-11.
QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao, et al. A new double terminal method of travelling wave fault location using wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 7-11.
- [4] 覃剑. 小波变换应用于输电线路行波故障测距的研究[D]. 北京: 中国电力科学院, 1998.
QIN Jian. Research of the travelling wave fault laction of transmission lines based on wavelet transform[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 1998.
- [5] 王超. 输电线路故障行波分析与测距[D]. 昆明: 昆明

表4 各节点的行波特征指数

Table 4 Traveling wave character index of each node

电站编号	离故障点最短距离/km	EMD方法计算行波到达时间/ms	能量值/p.u.	EMD分解层数	KE熵($\times 10^{-4}$)	分形数 F	延时 τ
1	6.760	0.030 5	7.092 0	7	6.171 40	1.166 0	106
2	12.700	0.053 0	7.161 1	7	5.038 70	1.126 5	108
4	12.294	0.056 5	7.112 5	8	1.157 00	1.177 5	146
6	22.294	0.098 5	8.293 9	6	1.412 60	1.044 1	142
3	27.669	0.112 0	10.460 5	6	1.346 00	1.061 7	109
5	33.629	0.129 0	13.797 1	6	1.980 70	0.791 2	156
7	36.559	0.146 0	10.476 3	6	1.509 20	0.934 8	111
8	43.644	0.170 0	13.612 0	5	0.637 21	1.026 1	200
10	51.283	0.204 0	12.476 3	5	0.485 55	0.912 3	200
9	66.478	0.252 5	17.070 3	5	1.493 70	0.899 4	153
11	70.557	0.272 5	13.725 0	6	1.703 80	0.949 3	162
12	75.958	0.291 5	14.371 0	4	0.931 88	0.499 9	200
13	126.818	0.484 0	13.925 1	4	1.273 60	0.431 8	200
14	144.131	0.540 0	18.894 4	4	0.932 35	0.441 5	200

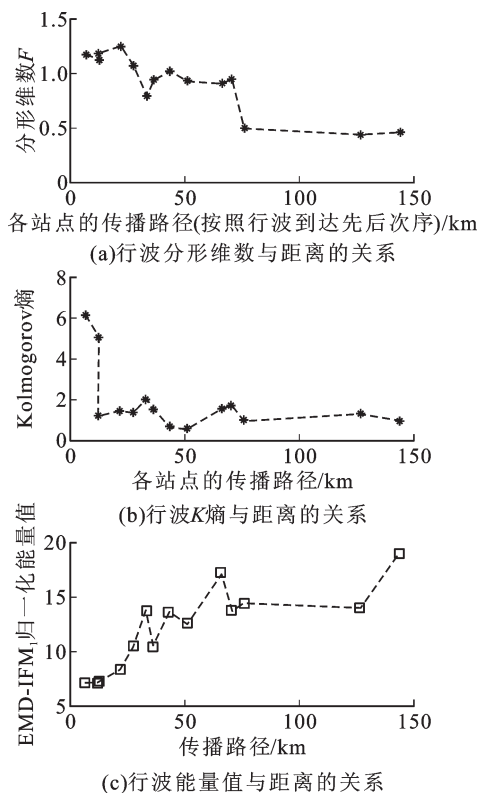


图 11 分维数、K 熵、能量值与距离的关系

Fig. 11 Relationship between Fractal dimension, K entropy, energy value and distance

理工大学, 2006.

WANG Chao. Analysis and fault location of travelling wave of transmission lines[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.

- [6] HUANG N E, SHEN Z. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time

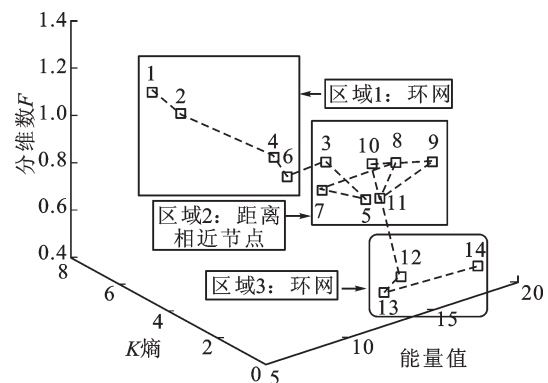


图 12 “能量—K 熵—分维数”三者之间的关系图

Fig. 12 Diagram between fractal dimension, K entropy, energy value and distance

series analysis[J]. Proc. Roy. Sec. London A, 1998(454): 903-995.

- [7] HUANG N E, SHEN Z. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999(31): 417-457.
- [8] 赵庆明, 贺家李, 李永丽. 基于希尔伯特—黄变换的超高速方向保护研究[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 79-83.
- ZHAO Qingming, HE Jiali, LI Yongli. Study of ultra-high-speed directional protection of transmission lines based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 79-83.
- [9] 李天云, 程思勇, 杨 梅. 基于希尔伯特—黄变换的电力系统谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 109-113.
- LI Tianyun, CHENG Siyong, YANG Mei. Power system harmonic analysis based on Hilbert-Huang transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 109-113.
- [10] 黄诚惕. 希尔伯特—黄变换及其应用研究[D]. 成都: 西

- 南交通大学, 2006.
- HUANG Chengti. Research of Hilbert-Huang transform and its application[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [11] NIE Chunyan, SHI Yaowu. The reaserch of weak signal detection based on cross-orrelation and chaos theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(1): 32-35.
- [12] 司大军, 束洪春, 陈学允, 等. 输电线路雷击的电磁暂态特征分析及其识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 64-69.
- SI Dajun, SHU Hongchun, CHEN Xueyun, et al. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 64-69.
- [13] WU Zhaohua, HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proc. Roy. Soc. London A, 2004 (460): 1594-1611.
- [14] VINCENT H T, HU S L J, HOU Z. Damage detection using empirical mode decomposition method and a comparison with wavelet analysis[C]//Proceedings of the Second International Workshop 011 Structural Health Monitoring. [S.l.]: Stanford, 1998: 891-900.
- [15] ZHU X, SHEN Z, ECKERMAN N D. Gravity wave characteristics in the middle atmosphere derived from the empirical mode decomposition method[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D14): 16545-16561.
- [16] COHEN L. Time-frequency analysis: Theory and application [Z]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.
- [17] YANG Hongying, YE Wu. Research and development of fault detection based on chaos theory for dynamic systems [J]. Automation & Instrumentation, 2007(1): 1-4.
- [18] LI Donghui, JIA Wei. Application of chaos theory in grounding fault detection of DC power supply system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 79-82.
- [19] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- LYU Jinhu, LU Jun'an, CHEN Shihua. Chaotic time series analysis and its application[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.
- [20] 赵 彤, 李庆民, 陈 平. OLTC 振动信号特征提取的动力学分析方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 41-46.
- ZHAO Tong, LI Qingmin, CHEN Ping. Dynamic analysis method for feature extraction of mechanical vibration signals of on-load tap changers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 41-46.
- [21] 张丽丽, 雷友发. 一个三维非线性系统的混沌动力学特征[J]. 动力学与控制学报, 2006, 4(1): 5-6.
- ZHANG Lili, LEI Youfa. The chaotic characters of a 3-dimensional nonlinear dynamics[J]. Journal of Dynamics and Control, 2006, 4(1): 5-6.

李 毅(1983—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事电力系统分析与控制、高电压与绝缘技术等方面的研究。

吴政球(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析与控制、分布式发电方面的研究。

李建奇(1962—), 男, 教授, 硕士生导师, 从事电力企业管理等方面的研究。

(上接第 56 页)

- load closing power transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [20] 金恩淑, 李晓娜, 夏国武, 等. 基于正序分量的变压器励磁涌流新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 7-11.
- JIN Enshu, LI Xiaona, XIA Guowu, et al. New criterion of transformer magnetizing inrush current based on positive sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 7-11.
- 闫富松(1975—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事供配电管理, 研究方向为电力系统保护与控制。
- 李朝晖(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。