

T型输电线路行波故障测距的改进算法

卢毅, 韩志锟, 汪焱春, 饶曙勇

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 对T型高压输电线路的行波故障测距方法进行了研究, 利用T型高压输电线路的三端故障行波测量数据, 使用互相关函数的改进方法——单位脉冲响应法求取两两端的信号时延。提出故障分支判别的新判据, 根据双端行波测距原理实现T型线路的故障测距。针对相关分析过程中可能出现的伪相关峰问题, 利用能量比法对三端故障行波的首波头进行大致的时延估算, 并以此为参照缩小相关峰的查找范围, 提高了时延估算的可靠性。仿真结果表明该方法正确, 且具有较高的测距精度, 在较大的环境干扰下可以实现T型线路的分支判别和故障测距。

关键词: T型线路; 行波; 故障测距; 干扰; 相关性分析

Improved fault location algorithm based on traveling waves for Teed-circuits

LU Yi, HAN Zhi-kun, WANG Yi-chun, RAO Shu-yong

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Travelling wave fault location of Teed circuits is studied. By using three terminals fault travelling wave measurement data of the Teed circuits, an improved algorithm of cross-correlation function which is called unit impulse response method is proposed to get the signal time delay of each two terminals. Based on which a new criterion is proposed for fault branch distinguishing, and then fault location for Teed line is realized by using two-terminal travelling wave fault location theory. In respect of pseudo correlation peaks possibly occurred in correlation analysis, the possible delay estimation of initial wave of three-terminal fault travelling wave can be gotten by using energy ratio treatment. By reference to this estimation, searching area of correlation peaks are reduced, thus the time delay estimation accuracy can be raised. The ATP/EMTP simulation results show that this method is correct and has very good location accuracy. And in the case of large environment random disturbance, this method can realize the fault line selection and fault location for Teed circuits.

Key words: Teed-circuits; traveling wave; fault location; disturbance; the correlation analysis

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0017-05

0 引言

高压输电线路是电力系统中发生故障最多的地方, 通过故障测距准确而迅速地找到故障点进而排除故障对电力系统有着重要的意义^[1]。一直以来, 输电线路故障测距都是电力系统研究的热点^[2-6]。随着电力系统的发展, T型线路已经越来越多地应用在高压电网中, 对T型线路的故障测距研究也越来越多^[7-8]。

T型线路的故障测距一般分为两个部分: 一是故障分支的判别; 二是故障点的测距。目前, 针对T型线路的故障测距研究主要利用参数计算的方法^[9-12], 采用行波方法的文献相对较少^[13-14]。

利用互相关函数则能反映两个信号所共有的频率成分, 能够完整地保留相位方面的信息的特性。

本文在考虑了环境干扰的情况下, 重点对相关分析法在T型线路行波故障测距中的应用以及相应的问题进行了研究, 并对测距的效果进行了详细的分析。

1 相关分析法^[15]

相关系数反映了两个固定波形 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 之间的相似程度。在实际使用中, 更需要研究两个波形在经历了一段时移以后的相似程度, 在这点上, 相关系数有其局限性, 需要引入相关函数的概念。

由理想模型可知, 两个传感器接受信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互功率谱函数 $G_{12}(\omega)$ 为

$$G_{12}(\omega) = X_1(\omega)X_2^*(\omega) = \alpha_1\alpha_2S(\omega)S^*(\omega)e^{-j\omega(\tau_1-\tau_2)} + \alpha_1S(\omega)e^{-j\omega\tau_1}N_{21}^*(\omega) + \alpha_2S^*(\omega)e^{j\omega\tau_2}N_{11}(\omega) + N_{11}(\omega)N_{21}^*(\omega) \quad (1)$$

由于 $s(t)$, $n_{11}(t)$ 和 $n_{21}(t)$ 之间彼此不相关, 因此

式(1)的后三项为零,式(1)简化成:

$$G_{12}(\omega)=X_1(\omega)X_2^*(\omega)=\alpha_1\alpha_2S(\omega)S^*(\omega)e^{-j\omega(\tau_1-\tau_2)} \quad (2)$$

为了锐化互相关函数的峰值,需要对互功率谱函数进行加权,这样两个接受到的信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互相关函数 $R_{12}(\tau)$ 可以表示为

$$R_{12}(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\psi_{12}(\omega)X_1(\omega)X_2^*(\omega)e^{j\omega\tau}d\omega \quad (3)$$

其中的加权函数 $\psi_{12}(\omega)=\frac{1}{|G_{12}(\omega)|}$, 这就是单位脉冲响应互相关法。

2 故障分支的判别及测距

图1为T型输电线路示意图,如在M点发生单相接地故障,高压输电线路将产生行波并以接近光速的速度向P、R、Q端传播。故障时刻电压相角大小主要影响行波的大小,当电压相角过零或者接近零时发生故障时,行波信号会很微弱,可能导致测距失败,这种情况时,利用重合闸产生的行波在故障点的反射可测出故障距离,也可以将行波法辅以阻抗法进行联合测距。不过,由于绝大多数线路故障是绝缘击穿导致的故障,故障发生在初始电压相角 10° 以下的几率非常低,95%发生在电压峰值附近的 30° 范围内,因此本文只考虑电压峰值附近的短路故障。

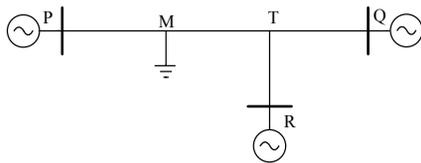


图1 T型输电线路示意图

Fig.1 Diagram of simulation model for Teed-line

P、R、Q三端到T节点的长度分别为 l_{PT} 、 l_{RT} 、 l_{QT} ; 3个端点之间的距离则分别为 l_{PR} 、 l_{PQ} 、 l_{RQ} 。根据双端行波故障测距的原理,分别计算故障点在参考线路PR、PQ、RQ的距离:

$$d_{PR}=\frac{l_{PR}-v(t_r-t_p)}{2} \quad (4)$$

$$d_{PQ}=\frac{l_{PQ}-v(t_q-t_p)}{2} \quad (5)$$

$$d_{RQ}=\frac{l_{RQ}-v(t_q-t_r)}{2} \quad (6)$$

式中: t_p 、 t_r 、 t_q 分别为故障行波到达P、R、Q的时间; v 为波速; d_{PR} 、 d_{PQ} 、 d_{RQ} 为一次测距

结果。

信号数据可以是电流信号或者是电压信号,如为电压信号可表示为:

$$\begin{aligned} V_r &= V_{r0} + kI \\ V_p &= V_{p0} + kI \end{aligned} \quad (7)$$

式中: V_{r0} 和 V_{p0} 分别表示R、P两端在理想情况下发生故障时的电压信号; I 是环境干扰; k 为干扰系数,通过调整 k 的值来改变 V_r 、 V_p 中干扰成分的大小。

故障分支的判据为:

若 $d_{PR} \leq l_{PT}$, 且 $d_{PQ} \leq l_{PT}$, 则故障在PT支路;

若 $d_{PR} > l_{PT}$, 且 $d_{RQ} \leq l_{RT}$, 则故障在RT支路;

若 $d_{PQ} > l_{PT}$, 且 $d_{RQ} > l_{RT}$, 则故障在QT支路。

判定故障分支后,进行测距:

$$d_{ji}=\frac{l_{ji}-v(t_i-t_j)}{2} \quad (8)$$

式中: j 为故障支路的端点; i 为距离 j 最近的非故障支路的端点; d_{ji} 为故障距离; l_{ji} 为两端点之间的线路距离。

随着 k 值的不断增加,干扰信号对测距的影响也逐渐变大,当 k 值大于某一数值后,将会出现故障分支判断错误或者故障点测距错误的情况。

3 仿真算例

为验证方法的有效性以及干扰对此方法的影响,对500kV单回T型线路进行ATP-EMTP仿真。仿真线路模型如图1所示。

线路长度 l_{PT} 、 l_{RT} 、 l_{QT} 分别为100km、200km、280km。线路的正序和零序参数为:

$$r_1=0.02083\Omega/\text{km}, \quad L_1=0.8984\text{mH}/\text{km},$$

$$C_1=0.0129\mu\text{F}/\text{km}; \quad r_0=0.1148\Omega/\text{km},$$

$$L_0=2.2886\text{mH}/\text{km}, \quad C_0=0.00523\mu\text{F}/\text{km}.$$

系统3端电源电势 \dot{E}_M 、 \dot{E}_Q 、 \dot{E}_R 分别为 $500\angle 0^\circ$ 、 $500\angle 30^\circ$ 、 $500\angle 60^\circ$ 。电源正序阻抗 Z_{P1} 、 Z_{Q1} 、 Z_{R1} 分别为 $28.3\angle 90^\circ$ 、 $32.0\angle 78.4^\circ$ 、 $43.19\angle 88.6^\circ$; 零序阻抗 Z_{P0} 、 Z_{Q0} 、 Z_{R0} 分别为 $26.3\angle 90^\circ$ 、 $28.14\angle 86.74^\circ$ 、 $29.09\angle 90^\circ$ 。信号数据的采样频率为1MHz,根据线路参数,波速 $v=292800000\text{m/s}$ 。

对仿真得到的P、Q、R端信号数据进行凯伦布尔相模变换,使用 β 模数据进行相关分析。

当PT段70km处发生A相接地短路时(接地

电阻 $50\ \Omega$), P、R、Q 三端所测得的无干扰故障电压行波如图 2 所示; 取干扰系数 $k=4\times 10^7$, 得到信噪比为 14 dB 的 P、R、Q 三端故障电压行波如图 3 所示。

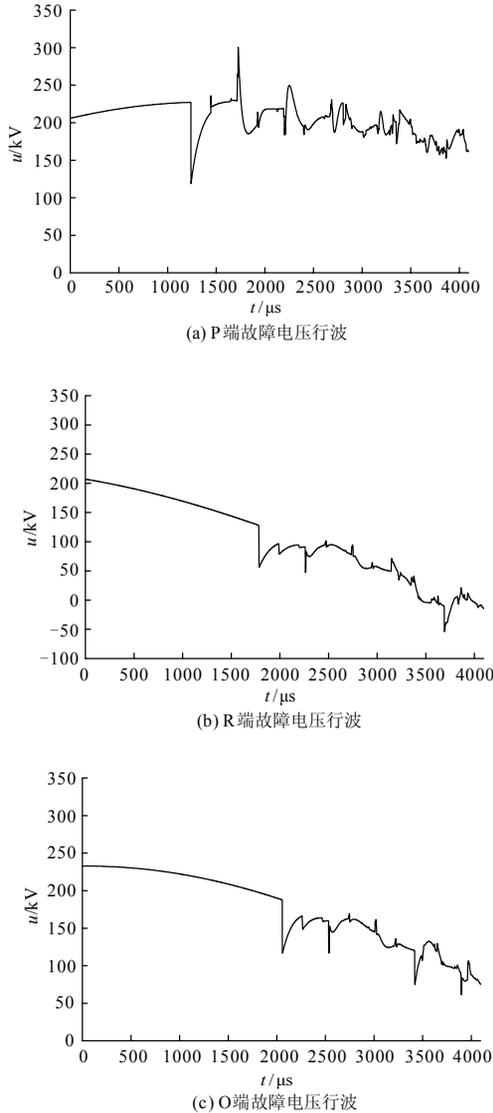


图 2 无干扰的三端故障电压行波

Fig.2 Three-terminal voltage travelling waves without noise

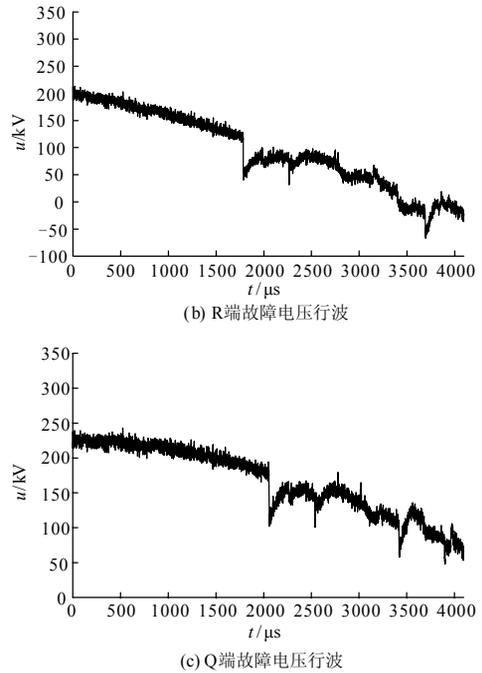
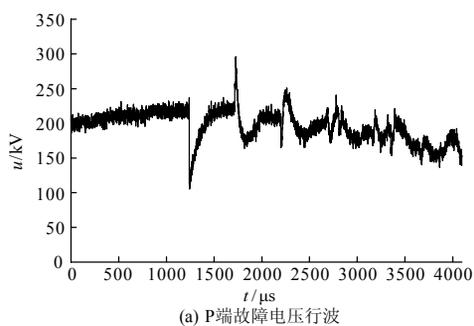


图 3 信噪比为 14 dB 的故障电压行波

Fig.3 Three terminal voltage travelling waves with SNR 14 dB

对于 T 型线路的行波故障来说, 由于各变电站设备及出线情况不同, 在估算波头时延的时候很容易受到反射波的影响。这部分反射波随着故障的地点、线路的长度不同而变化, 不易把握。在某些情况下, 相关分析的结果会出现伪相关峰大于真实相关峰的情况。

鉴于此问题, 本文采用了在粗判的基础再进行精细判别的方法, 具体如下:

(1) 使用能量比法^[16]对三端的故障行波进行预处理, 通过一个给定时间窗内的前后能量变化找到行波信号最大值位置, 即直达波头到达母线的时刻, 再将各端直达波到达的时间两两相减得到信号的大致时延。图 4 是 P 端故障行波的能量比法处理的一个例子, 其中信噪比为 14 dB, 窗宽为 20 个记录点。

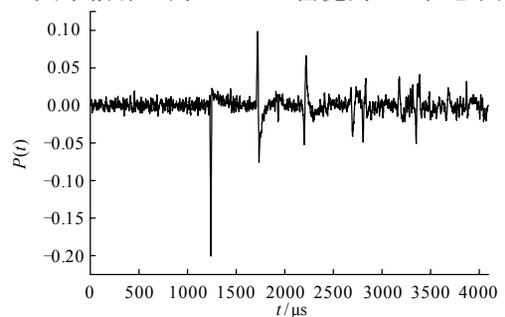


图 4 P 端行波能量比处理结果

Fig.4 Energy-ratio treatment result of P terminal travelling wave

(2) 以能量比预处理中得到的大致时延位置为中点, 前后 50 个记录点为查找范围, 在相关分析波形中的 100 个记录点内进行查找, 其范围内的最大值点就是准确的信号时延。

图 5 是考虑到干扰情况(信噪比 14 dB)下的 P、R 端故障电压行波的相关分析结果, 图中最大值所对应的时间即为两信号的时延。根据以上的处理方法, 首先将 P、R 两端的故障行波作能量比变换, 得到 P、R 两端大致的信号时延为 543 μs , 以此为依据, 在 P、R 相关分析的结果中进行查找, 得到信号的准确时延为 546 μs 。以此类推, 可以求得 d_{PR} 为 70.065 6 km, d_{PQ} 为 30.391 2 km, d_{RQ} 为 110.033 km。根据故障分支判据可知, 故障在 PT 段, 由式 (8) 可得故障距离为 70.065 6 km, 测距误差为 0.09%。

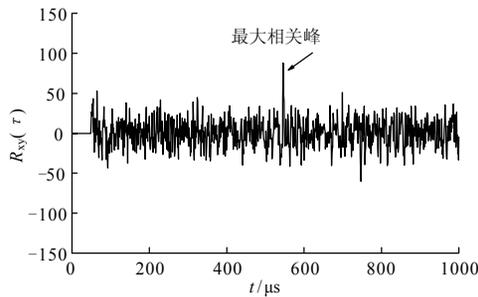


图 5 PR 端故障行波相关分析结果

Fig.5 The correlation analysis of PR terminal faulty travelling waves

表 1、表 2 和表 3 分别是无干扰、信噪比为 14 dB、信噪比为 9 dB 的三种不同干扰情况下的各种故障的测距结果, 其中接地电阻均为 50 Ω 。

表 1 无干扰时各种故障条件下的测距结果

Tab.1 Result of fault location under different fault type conditions without noise

故障支路	故障距离/km	故障类型			最大误差/%
		A-G	BC-G	ABC	
PT	5	5.356 8	5.356 8	5.356 8	7.136
	40	40.2	40.2	40.2	0.5
	70	70.065 6	70.065 6	70.065 6	0.093 714
	95	94.953 6	94.953 6	94.953 6	0.048 84
RT	5	5.356 8	5.356 8	5.356 8	7.136
	70	70.065 6	70.065 6	70.065 6	0.093 714
	130	129.943	129.943	129.943	0.043 85
	195	195.091	195.091	195.091	0.046 667
QT	5	5.536	5.536	5.536	10.72
	100	100.11	100.11	100.11	0.11
	175	174.921	174.921	174.921	0.045
	275	274.912	274.912	274.912	0.032

表 2 信噪比为 14 dB 时各种故障条件下的测距结果

Tab.2 Result of fault location under different fault type conditions with SNR 14 dB

故障支路	故障距离/km	故障类型			最大误差/%
		A-G	BC-G	ABC	
PT	5	5.356 8	5.356 8	5.356 8	7.136
	40	40.2	40.2	40.2	0.5
	70	70.065 6	70.065 6	70.065 6	0.093 714
	95	94.953 6	94.953 6	94.953 6	0.048 84
RT	5	5.356 8	5.356 8	5.356 8	7.136
	70	70.065 6	70.065 6	70.065 6	0.093 714
	130	129.943	129.943	129.943	0.043 85
	195	195.091	195.091	195.091	0.046 667
QT	5	5.536	5.536	5.536	10.72
	100	100.11	100.11	100.11	0.11
	175	174.921	174.921	174.921	0.045
	275	274.912	274.912	274.912	0.032

表 3 信噪比为 9 dB 时各种故障条件下的测距结果

Tab.3 Result of fault location under different fault type conditions with SNR 9 dB

故障支路	故障距离/km	故障类型			最大误差/%
		A-G	BC-G	ABC	
PT	5	5.356 8	0.379 2	5.356 8	—
	40	40.2	40.2	40.2	0.5
	70	70.065 6	70.065 6	70.065 6	0.093 714
	95	95.1	94.953 6	94.953 6	0.105 3
RT	5	105.055	5.356 8	5.356 8	—
	70	70.065 6	70.065 6	70.065 6	0.093 714
	130	129.943	129.943	129.943	0.043 85
	195	195.091	195.091	195.091	0.046 667
QT	5	5.536	5.536	5.536	10.72
	100	100.11	100.11	100.11	0.11
	175	174.921	174.921	174.921	0.045
	275	275.058	275.058	274.912	0.032

从表中可以看出, 信噪比为 14 dB 时的测距结果与无干扰时结果相同, 都能成功测距并有相同的精度; 当信噪为 9 dB 时, PT 段 BC-G 和 RT 段 A-G 的近端 (5 km) 接地故障开始出现测距失败, 此时出现明显的近端测距死区; 如果继续增大干扰, 则近端测距死区逐渐增大, 本文的故障测距方法已经不再适用, 若要得到正确的测距结果, 就必须考虑首先对故障行波做降噪处理了。

4 结论

本文以双端行波故障测距原理为基础,利用三端测量数据,提出了基于改进的互相关函数的T型线路行波故障测距方法。EMTP仿真结果表明该方法在一定的环境干扰范围内可以准确找到各端点测得行波首波头的时延,故障分支判据有效,且测距精度较好,具有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
GE Yao-zhong. New types of relay protection and fault location: theory and techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [2] 成乐祥, 李扬, 唐瑜. 基于改进形态 Haar 小波在输电线路故障测距中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 30-34.
CHENG Le-xiang, LI Yang, TANG Yu. Research and application of improved morphological Haar wavelet in transmission line fault location[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 30-34.
- [3] 李强, 王银乐. 高压输电线路的故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 192-197.
LI Qiang, WANG Yin-le. Fault location methods for high voltage power transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 192-197.
- [4] 周鑫, 吕飞鹏, 吴飞, 等. 基于小波变换的 T 型线路故障测距新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 8-11, 23.
ZHOU Xin, Lü Fei-peng, WU Fei, et al. A new fault location method for T-connection transmission lines based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 8-11, 23.
- [5] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76-80.
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin. Research of fault location based on current traveling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 76-80.
- [6] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变化的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao, et al. A new double terminal method of traveling wave fault location using wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [7] Kalam A, Johns A T. Accurate fault location technique for multi-terminal EHV lines[C]. //IEEE international Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong: 1991.
- [8] Girgis A A, Hart D G, Peterson W L. A new fault location technique for two and three-terminal lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 98-107.
- [9] 高厚磊, 安艳秋, 江世芳. 超高压 T 接线路高精度故障测距算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(20): 51-54.
GAO Hou-lei, AN Yan-qiu, JIANG Shi-fang. Study on accurate fault location algorithm for EHV Teed lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(20): 51-54.
- [10] 田羽, 范春菊, 龚震东, 等. 三侧同杆双回线互联的 T 型线路测距新方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9): 63-66.
TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong, et al. Fault location algorithm for T-type lines with parallel transmission lines on same pole at three sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9): 63-66.
- [11] 田羽, 范春菊, 龚震东, 等. 同杆双回线反序电流特点及其在 T 型线路测距中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 67-71.
TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong, et al. A faulted line selection method of parallel transmission teed line on the basis of differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 67-71.
- [12] 龚庆武, 王志梅, 雷庆生, 等. T 型接线的一种新型精确故障定位算法的研究[J]. 继电器, 1999, 27(3): 20-22.
GONG Qing-wu, WANG Zhi-mei, LEI Qing-sheng, et al. The study on new accurate fault location algorithm for teed transmission line using three-terminal signal[J]. Relay, 1999, 27(3): 20-22.
- [13] 张峰, 梁军, 杜涛, 等. T 型线路的行波精确故障测距新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 527-532.
ZHANG Feng, LIANG Jun, DU Tao, et al. Accurate fault location algorithm based on traveling waves for teed-circuits[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 527-532.
- [14] Silva M da, Coury D V, Oleskovicz M, et al. An alternative fault location algorithm based on wavelet transforms for three-terminal lines[C]. //Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. IEEE, 2008: 1-7.
- [15] Omologo M, Svaizer P. Use of the cross-power-spectrum phase in acoustic event localization[J]. IEEE Trans on Speech and Audio Processing, 1997, 5(3): 288-292.

5 结论

(1) 提出了环境友好系数的概念, 建立了环境效益模型, 定量计算了机组的投建与运行所形成的环境成本。很好地反映了发电机组在环境方面的特点。

(2) 本文所建电源规划模型兼顾电力市场环境风电的环境、社会效益和电力系统供电可靠性。仿真结果表明了风电在环境成本和社会效益上的强大优势, 为能源可持续发展战略背景下大力发展风电的实施提供了强有力的理论依据。

参考文献

[1] 袁铁江, 晁勤, 吐尔逊·伊不拉音, 等. 电力市场环境下含风电机组的环境经济调度模型及其仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 67-68.
YUAN Tie-jiang, CHAO Qin, TUERXUN Yibulayin, et al. An environmental/economic dispatch model for power grid containing wind power generation units and its simulation in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 67-68.

[2] 丁明, 石雪梅. 基于遗传算法的电力市场环境下电源规划的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 43-49.
DING Ming, SHI Xue-mei. Study of generation expansion planning based on genetic algorithms in the environment of electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 43-49.

[3] 吴耀武, 王峥, 唐权, 等. 基于C-PSO的水火电混合电力系统电源规划[J]. 继电器, 2006, 34(9): 64-69.
WU Yao-wu, WANG Zheng, TANG Quan, et al. Generation expansion planning of hydro-thermal mixed power system based on C-PSO[J]. Relay, 2006, 34(9): 64-69.

[4] 贺峰, 熊信银, 吴耀武. PGA在电力系统电源规划中的应用[J]. 继电器, 2003, 31(6): 26-29.
HE Feng, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Generation expansion planning of power system by partheno-genetic algorithm[J]. Relay, 2003, 31(6): 26-29.

[5] 王建学, 高卫恒, 王锡凡, 等. 考虑环境成本的电源规划JASP模型[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 1016-1018.
WANG Jian-xue, GAO Wei-heng, WANG Xi-fan, et al. Improved JASP model of generation planning with environment cost[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(8): 1016-1018.

[6] 程浩忠. 电力系统规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[7] 黄伟, 曲和南, 徐明荣, 等. 电力系统电源规划的数学模型及实现[J]. 现代电力, 2000, 17(2): 8-13.
HUANG Wei, QU He-nan, XU Ming-rong, et al. Model and realization for sources planning of power systems[J]. Modern Electric Power, 2000, 17(2): 8-13.

[8] 张湘艳, 曾克娥, 陈金富. 电源规划中的可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 4-6.
ZHANG Xiang-yan, ZENG Ke-e, CHEN Jin-fu. Reliability analysis in generation system planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 4-6.

[9] 李开海. 未来不确定条件下电源规划投资模型[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(1): 119-122.
LI Kai-hai. Investment model for expansion planning of electric generating systems under uncertainty[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2004, 26(1): 119-122.

[10] 王小平, 曹力铭. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

[11] 蒲永红, 张明军. 基于混合编码改进遗传算法的无功优化[J]. 继电器, 2006, 34(23): 20-23.
PU Yong-hong, ZHANG Ming-jun. Reactive power optimization using an improved genetic algorithm based on hybrid-code[J]. Relay, 2006, 34(23): 20-23.

收稿日期: 2010-02-07; 修回日期: 2010-05-21

作者简介:

袁建党 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: budong979@163.com

袁铁江 (1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为风力发电及其并网技术;

晁勤 (1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事并网型风力发电系统及其控制方面的研究。

(上接第 21 页 continued from page 21)

[16] 卢毅, 姜玉磊, 杨静. 能量比函数法估算局部放电时延[J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 87-89.
LU Yi, JIANG Yu-lei, YANG Jing. Research on delay estimation of partial discharges based on energy ratio function[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (5): 87-89.

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-06-28

作者简介:

卢毅 (1957-), 男, 副教授, 主要从事电力需求侧管理、高电压技术研究和教学工作;

韩志银 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为输电线路故障测距. E-mail: hanzhikun@foxmail.com