

基于 PSO-ENN 算法的高压直流输电线路故障测距

刘 晶, 翁公羽, 付 华

(1. 辽宁省电力有限公司检修分公司锦州分部, 辽宁 锦州 121000; 2. 辽宁省电力有限公司检修分公司输电运检中心, 沈阳 110000; 3 辽宁工程技术大学电气控制与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 高压直流输电线路故障测距对保障输电线路安全稳定的运行具有十分重要的意义。为了提高故障测距的精度,利用故障频谱对线路故障进行测距分析,并且故障行波在传播过程中具有强烈的固有频率信号。因此,文中将固有频率主频以及 2 倍频的幅值和频率作为输入训练样本,将故障距离作为输出训练样本,提出一种基于 Elman 动态神经网络的高压直流输电线路故障测距算法,并采用粒子群(PSO)算法优化 Elman 神经网络的初始权值和阈值。最后,采用 MATLAB 软件进行仿真,结果表明该算法具有较高的收敛速度与测距精度,可以为高压直流输电线路故障测距提供理论支持。

关键词: 行波频谱; 故障测距; 固有频率; Elman 神经网络; 粒子群算法; MATLAB

Fault Location on HVDC Transmission Line Based on PSO-ENN Algorithm

LIU Jing, WENG Gongyu, FU Hua

(1. Liaoning Electric Power Co., Ltd., Maintenance Branch Company Jinzhou Branch, Liaoning Jinzhou 121000, China;
2. Transmission Inspection Center of Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China;
3. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China)

Abstract: To improve the accuracy of fault location on high voltage direct current(HVDC) transmission line, fault spectrum is used to analyze the fault location. The fault traveling wave in propagation process contains strong natural frequency signal. Therefore, taking the natural frequency and two-octave frequency as training sample, an HVDC transmission line fault location algorithm based on dynamic Elman neural network is proposed, and the particle swarm optimization algorithm is used to optimize the initial weights and threshold. Simulation via MATLAB shows that the proposed algorithm possesses higher convergence speed and accuracy, and it can be applied to fault location on HVDC transmission line.

Key words: traveling-wave spectrum; fault location; natural frequency; Elman neural network; particle swarm optimization; MATLAB

0 引言

高压直流输电线路作为电力系统中的重要组成部分,担任着传输电能的艰巨任务,并且该输电线路承载容量大、传送距离远、节点连接简单、功率调节方便,在中国具有广阔的发展前景^[1-2]。但在中国地区范围内,输电线路需要经过各种各样艰苦的地形和气候以及受到各种自然条件的影响,这将会导致

线路产生故障,线路故障既影响我国经济的发展也对中国电力系统的运行产生很大的危害。准确地对故障点进行定位,能够节约查找线路的人力与物力,并能尽快处理故障,迅速恢复供电,减小因停电造成的损失。因此,研究发展精确可靠的故障测距算法,能够及时保护输电线路的安全、稳定运行,会充分提高中国未来电力系统的经济发展。

直流故障测距的方法有很多,在实际应用中主要有行波法和故障分析法^[3-4]。行波法的基本原理按测距端口可以分为 A、D 两种模式^[5],A 型为单端测

收稿日期:2016-02-12; 修回日期:2016-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51274118)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51274118)。

距模式, D型为双端测距模式。在实际测距方法中, 通常采用以 D型为主、A型为辅的测距方式。文[6]研究了单端与双端行波故障定位方法, 并将其用于直流输电线路, 结果表明, 行波法测距误差一般在几千米范围内; 文[7]采用小波变换的基本原理对直流输电线路进行故障定位, 小波变换有良好的表征信号的能力, 并能去除干扰噪声。但是, 采用行波法进行测距需要准确的识别行波波头, 而在输电线路中, 难免会存在过渡电阻, 导致波头的幅值产生变化, 很难准确的定位到波头的起点, 大大降低了定位的准确度。故障测距的另一种方法故障分析法利用采集到的电压、电流等故障数据, 经过一系列的分析计算, 求出故障点到采集数据点的距离; 文[8]提出一种基于时域单端的故障定位算法, 利用在电力系统中由整流侧提供故障电流, 并得到相关参数分布的模型, 进而计算故障的电压、电流分布, 最后利用线路故障点的边界条件定位故障点; 在单端故障定位的基础上, 文[9]提出了基于双端时域故障的定位方法, 在输电线路参数并不是很准确的情况下, 将智能算法中的遗传算法应用到双端时域故障定位, 定位精度有了很大的提升。但是, 线路参数的变化以及电力系统中频率特性的改变会影响故障分析法的定位精度, 并且输电设备和数据采集的暂态特性不同也有可能影响定位精度。

故障行波的频谱能够反映行波幅频特性, 称之为固有频率^[10]。利用故障行波的固有频率可以进行故障测距, 而且不用识别行波波头, 只需要利用故障行波的暂态数据, 提取其固有频率就可以计算故障点的距离。因此, 文中采用 Elman 动态神经网络^[11], 该网络具有较强的函数拟合能力以及网络本身自带反馈结构, 将固有频率的幅值和频率作为网络的训练样本输入, 故障距离作为网络的训练样本输出。提出基于 Elman 动态神经网络的高压直流输电线路故障测距算法, 并采用粒子群算法对神经网络的初始权值和阈值进行优化, 充分提高其算法的运算效率。在 MATLAB 软件平台上进行算法程序仿真。结果表明, 该算法测距稳定, 可靠性高。

1 固有频率故障测距法

1.1 固有频率测距法

输电线路某个点发生故障后, 故障处产生的初始行波会在故障处和系统之间来回反射, 产生故障行波, 在频域上表现为一系列特定频率的谐波, 即为故障行波固有频率。根据电流函数的特征公式^[12], 固有频率、故障距离、边界条件之间的关系为

$$1 - a_1 a_2 e^{-2 \frac{s d}{v}} = 0. \quad (1)$$

式(1)中: v 为行波传播速度; d 为故障距离; f 为固有频率; s 的实部代表行波衰减系数, 虚部代表固有频率。边界条件包括测距点的反射系数 a_1 、故障点的反射系数 a_2 。

$$a_1 = \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c}; \quad (2)$$

$$a_2 = \frac{Z_f - Z_c}{Z_f + Z_c}. \quad (3)$$

式(2)、(3)中, Z_s 为系统输电侧阻抗; Z_c 为线路传输阻抗; Z_f 为故障点处的阻抗。

对式(1)进行求解

$$d = \frac{(\alpha_M + \alpha_F + 2k\pi)v_k}{2\pi f_k} \quad k=0, \pm 1, \dots. \quad (4)$$

式(4)中, α_M 和 α_F 分别为 a_1 和 a_2 对应的反射角。从故障行波的频谱中可知, 频谱中第一个峰值所对应的幅值最大, 对应的该频率为主频, 文中通过提取主频研究故障测距算法。

1.2 可行性分析

高压系统中, 母线出线相对较少, 系统电压稳定, 故障产生的行波暂态信号容易提取。因此, 从暂态信号中提取固有频率, 通过计算其幅值和频率与故障距离之间的函数关系, 进而能够求出故障距离。暂态行波波形及频谱图见图 1。

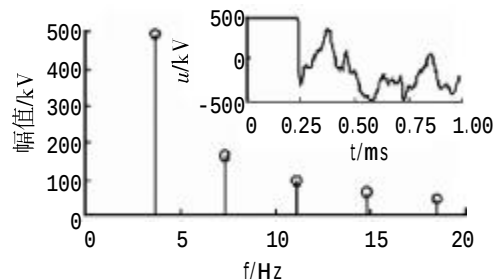


图1 暂态行波波形及频谱图

Fig. 1 Transient traveling wave of waveform and spectrum

从图 1 中可以看出, 故障行波在输电线路的传播过程中, 其幅值逐渐衰减并且波头产生严重畸变, 从时域中提取行波波头变得非常困难。而文中从频域的角度进行测距, 避免了因识别反射波头带来的误差。即使是在图 1 中故障行波波头衰减和畸变的情况下, 也能够提取出准确的固有频率, 并且该方法测距稳定性好、可靠性高。

固有频率算法也有一定的缺点, 因为反射角 α_M 需要通过复杂的计算, 系统参数也必须满足一定的精度范围, 此外, 在识别行波主频时也会受到母线不同频率形式的干扰, 进而影响算法的测距精度^[13], 但在固有频率与故障距离之间存在着一定的内在联

系。考虑到系统的非线性、动态性、时变性等特点,采用 Elman 动态神经网络建立固有频率与故障距离之间的预测函数模型,避免了复杂的计算,减小了由于系统参数精度不够而产生的误差,提高了测距算法的准确性。

2 Elman 动态神经网络

2.1 神经网络

Elman 神经网络(ENN)是一种动态的具有局部反馈的神经网络,它不仅具有输入层、隐含层、输出层,还有一个特殊的联系单元,用来记忆隐层单元以前时刻的输出,使该网络具有动态记忆功能,其结构见图 2。

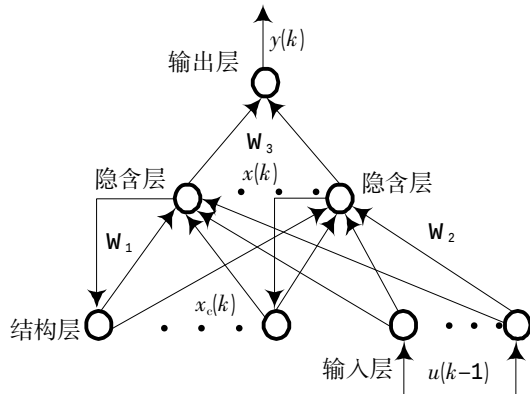


图 2 Elman 神经网络结构图

Fig. 2 Elman neural network structure

图 2 中: w_1 为结构层和隐含层连接权值; w_2 为输入层和隐含层连接权值; w_3 为隐含层和输出层连接权值。网络的数学表达式为

$$x_c(k) = x(k-1); \quad (5)$$

$$x(k) = f[w_1 x_c(k) + w_2 u(k-1)]; \quad (6)$$

$$y(k) = g[w_3 x(k)]. \quad (7)$$

式(5)-(7)中, $f()$ 为结构层的传递函数,多为 sigmoid 函数,即

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}. \quad (8)$$

$g()$ 为输出层的传递函数,多取为线性函数^[14],即 $y(k) = w_3 x(k)$ 。

设系统第 k 步的实际输出为 $y_d(k)$,则目标函数即误差函数可表示为

$$E(k) = \frac{1}{2} [y_d(k) - y(k)]^T [y_d(k) - y(k)]. \quad (10)$$

2.2 训练样本及网络参数确定

训练神经网络需要考虑样本属性,选择的样本既要反映在故障距离不同时的频率特点,也要考虑网络本身的性能。因此,考虑到固有频率的频率特征性质,选择其主频及 2 倍频的频率和幅值作为神经

网络的输入训练样本,选择故障距离作为输出训练样本。但幅值、频率、故障距离有很大的数量级差距,为了使输入输出分量在网络训练中有同等的权重分布,对各分量归一化处理,改变其变化范围在(0,1)之间,提高训练的收敛速度。

根据输入输出的样本属性,设置 Elman 神经网络的输入神经元数目为 4,输出神经元数目为 1。通过试凑法,最终设置隐层神经元数为 10。

3 PSO-ENN 优化算法

粒子群优化算法(PSO)是近几年发展起来的一种新型进化算法,与模拟退火法相似,它也是从随机解的角度出发,通过迭代寻找最优解。具体是通过个体粒子间的竞争和协作产生群体智能对搜索进行优化。粒子群算法是一种并行算法,与遗传算法相比,该算法原理简单、实现容易、运行效率高、全局搜索性能好。

为了提高 Elman 神经网络训练的收敛速度,避免其陷入局部极小点,需要选择最好的网络初始权值和阈值。因此,针对粒子群算法精度高、收敛快、搜索能力强等优点,文中采用 PSO 算法优化网络的初始权值和阈值(PSO-ENN),提高网络的预测精度和收敛速度,算法流程图见图 3。

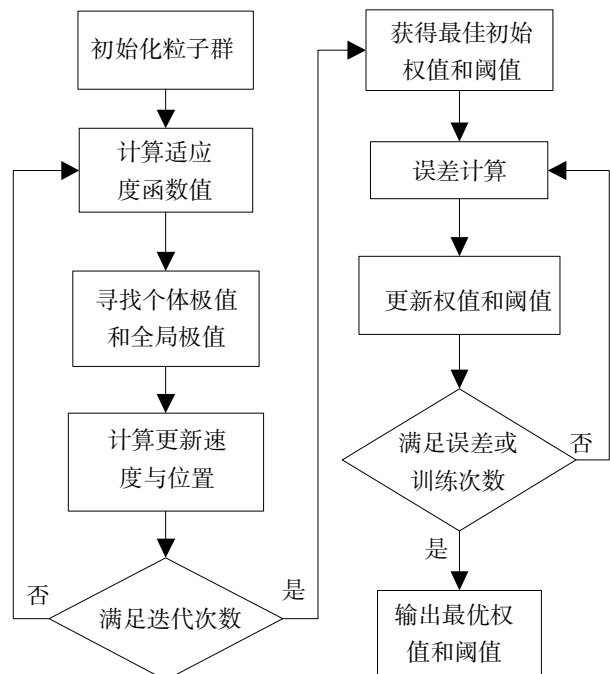


图 3 PSO-ENN 优化算法流程图

Fig. 3 Flowchart of PSO-ENN optimization algorithm

该算法通过适应度来评价解的品质,文中选取网络的实际输出与预测输出之间的均方误差作为适应度函数

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_d(k)]^2. \quad (11)$$

式(11)中: $y(k)$ 为第 k 个样本的实际输出; $y_d(k)$ 表示第 k 个样本的预测输出。

PSO算法中粒子有速度和位置两个变量,其更新方程为:

$$v_{i,j}(t+1) = \omega v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(t)]; \quad (12)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad j=1, 2, \dots, d_o. \quad (13)$$

式(12)、(13)中: i 代表第 i 个粒子; j 代表粒子的第 j 维; c_1 与 c_2 为加速常量,在 $(0, 2)$ 之间取值; $r_1 \sim U(0, 1)$ 、 $r_2 \sim U(0, 1)$ 为相互独立的随机函数。

4 仿真分析

网络训练之前需要取得输入输出样本集。文中通过PSCAD软件平台,搭建输电系统仿真模型^[15],见图4。

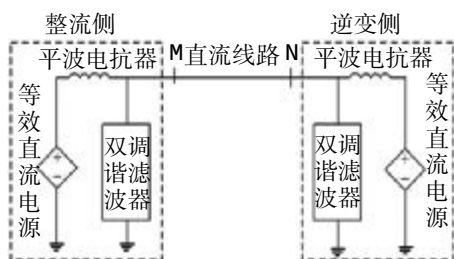


图4 高压直流输电系统简化模型

Fig. 4 HVDC system simplified model

参数设置为:输电线路总长500 km;额定电压 ± 500 kV;额定电流3 kA;平波电抗器0.3 H;选用双调谐滤波器。

输入输出样本的选取涉及两个方面:①输入输出需要考虑所有故障模式;②在输电线路系统中,数据要能足够满足训练要求。通过对以上模型的仿真,得到2 000组仿真数据,随机选取1 500组进行模型预测,剩余500组作为检验。

在PSO算法中,取粒子数 $N=200$;取加速常量 $c_1=2$ 与 $c_2=2$;迭代次数 $M=2\ 000$ 。Elman网络中,最大迭代500次,误差取0.003。采用MATLAB软件平台,分别对原始网络和优化后网络进行仿真,误差曲线见图5、6。

由图5可以看出,未经优化的网络需经过500次以上训练才可收敛;而从图6中可知,权值和阈值在PSO算法优化的作用下,网络的训练速度有很大提高,训练后网络经过300次训练就能达到所需的误差要求。这是由于粒子群算法具有全局搜索能力,可以充分提高整体对最优解的搜索速度,也能够快速的跳出局部最优并收敛于全局最优解且满足精度

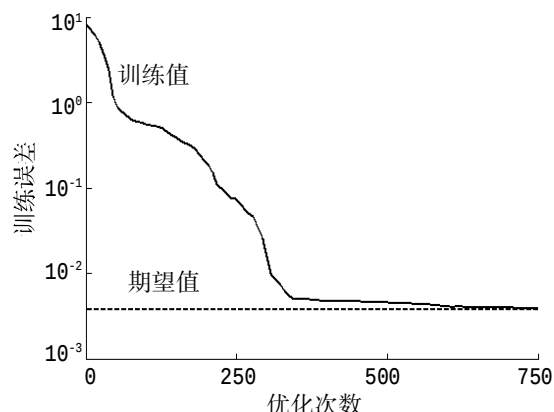


图5 原网络收敛曲线

Fig. 5 Original network convergence curve

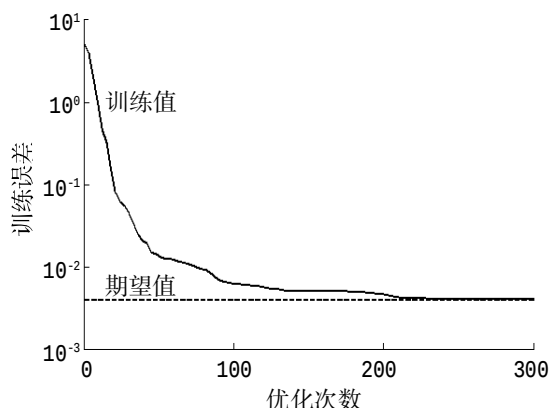


图6 优化后网络收敛曲线

Fig. 6 Optimized network convergence curve

要求^[16-17],进而得到最优的网络初始权值和阈值。由此可见,采用PSO算法对网络进行优化,可提高算法的全局搜索能力,加快收敛速度,从而提高故障测距精度。

5 故障测距结果检验

根据以上Elman神经网络训练结果,可以对高压直流输电线路进行测距。选取线路中10个故障点作为测距点,考虑到故障测距受到过渡电阻的影响,取过渡电阻分别为0、50、100 Ω 。根据以上参数的选取,其测距结果见表1。

表1 故障测距结果

Table 1 Fault location results

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	测距结果/km	相对误差/%
25	0/50/100	25.08	0.32
75	0/50/100	75.27	0.36
125	0/50/100	124.48	-0.42
175	0/50/100	174.46	-0.31
225	0/50/100	225.84	0.37
275	0/50/100	273.89	-0.40
325	0/50/100	326.61	0.50
375	0/50/100	377.04	0.54
425	0/50/100	423.52	-0.35
475	0/50/100	473.02	-0.42

从表 1 中可以看出,在输电线路的全线范围内,该故障测距算法都能实现准确可靠的测距,而且其测距精度不随着故障距离以及过渡电阻的变化而变化,一般控制在以内。即使在不同运行方式与控制模式的高压直流输电系统换流站中,也不影响故障行波的频谱以及固有频率与故障距离之间的内在联系。因此,对于提高电力系统的测距精度与稳定性,该测距算法具有很高的参考价值。

6 结论

1)文中提出了一种基于 PSO-ENN 算法的高压直流输电线路故障测距。利用故障行波固有频率与故障距离之间的内在函数联系以及 Elman 动态神经网络的非线性函数模型预测能力,从而实现对高压直流输电线路的准确故障测距。

2)采用 PSO 算法对网络的初始权值和阈值进行寻优,避免网络训练时陷入局部最优,加快其收敛速度。

3)通过 PSCAD 以及 MATLAB 仿真软件平台对算法进行仿真。结果表明,测距误差基本控制在以内,可知该测距算法具有较强的准确性与可靠性。

参考文献:

- [1] 赵畹君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
ZHAO WanJun. High voltage direct current transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 李立涅.直流输电技术的发展及其在我国电网中的作用[J]. 电力设备,2004(11):1-3.
LI Licheng. Development of HVDC transmission technology and its role in power network in China[J]. Electrical Equipment, 2004(11):1-3.
- [3] 李沛,钱亚磊.国内外高压输电线路故障定位方法的研究[J]. 煤矿机电,2012(5):22-26.
LI Pei, QIAN Yalei. Research on fault locating methods of high-voltage transmission line[J]. Coal Mine Mechanical and Electrical, 2012(5):22-26.
- [4] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等.高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(5):133-137.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5):133-137.
- [5] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996.
GE Yaozhong. New type of relay protection and fault location principle and technology[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,1996.
- [6] 谢菁,陈平.直流输电线路行波故障测距系统[J]. 山东理工大学学报,2006,20(3):47-50.
- XIE Jing, CHEN Ping. A traveling wave based fault locating system for HVDC transmission lines[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2006, 20(3):47-50.
- [7] CHEN Ping, XU Bingyin, LI Jing, et al. Modern traveling wave based fault location techniques for HVDC transmission lines[J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(2):139-143.
- [8] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等.基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):75-80.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A fault location method for HVDC transmission lines on the basis of distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13):75-80.
- [9] 李洪波.超高压直流输电线路故障测距原理研究及软件开发[D]. 天津:天津大学,2009.
LI Hongbo. Research on theory of fault location and software development for HVDC lines[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [10] 夏璐璐,何正友,李小鹏,等.基于行波固有频率和经验模态分解的混合线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(18):67-73.
XIA Lulu, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. A fault location method based on natural frequencies and empirical mode decomposition for mixed overhead-cable lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18):67-73.
- [11] 高钦和,王孙安.基于 Elman 神经网络的非线性动态系统辨识[J]. 计算机工程与应用,2007,43(31):87-89.
GAO Qinhe, WANG Sunan. Identification of nonlinear dynamic system based on Elman neural network[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(31):87-89.
- [12] 郭林勇,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.
- [13] 齐建平,杨春静,赵海成.基于神经网络的高压直流输电线路故障测距[J]. 电力科学与工程,2014,30(3):45-49.
QI Jianping, YANG Chunjing, ZHAO Haicheng. Fault location method for HVDC transmission lines based on ANN[J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(3):45-49.
- [14] 韩旭明. Elman 神经网络的应用研究[D]. 天津:天津大学计算机科学与技术学院,2006.
HAN Xuming. Elman neural network application research[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [15] 陈勇,吴艳辉.基于 PSCAD/EMTDC 的高压直流输电控制系统的仿真分析[J]. 电力科学与工程,2008,24(9):10-13.

(下转第 163 页)

- [6] 高 强, 张鑫林, 罗雪军, 等. 基于 ISO/IEC 13335 的电力通信网安全性能评估[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 83-87.
GAO Qiang, ZHANG Xinlin, LUO Xuejun, et al. Security evaluation of communication network of electric system based on ISO/IEC 13335[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 83-87.
- [7] 冯小安, 解鸿斌, 刘艳平. 基于模糊综合评判法的电力网络信息系统安全评估[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 40-43.
FENG Xiao'an, XIE Hongbin, LIU Yanping. Security evaluation of power network information systems based on fuzzy comprehensive judgement[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 40-43.
- [8] 郭志忠. 电网自愈控制方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 85-91.
GUO Zhizhong. Scheme of self-healing control frame of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 85-91.
- [9] SHENG S, LI K K, CHAN W L, et al. Agent-based self-healing protection system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 610-618.
- [10] 张海瑞, 韩 冬, 刘玉娇, 等. 基于反熵权法的智能电网评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 24-29.
ZHANG Hairui, HAN Dong, LIU Yujiao, et al. Smart grid evaluation based on anti-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 24-29.
- [11] 李如琦, 苏浩益, 凌武能, 等. 基于云模型和灰关联投影法的烟气脱硫技术优选[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(23): 21-26.
LI Ruqi, SU Haoyi, LING Wuneng, et al. Optimization of flue gas desulphurization technologies based on cloud model and grey relation projection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(23): 21-26.
- [12] 魏新江, 余 银, 张世民. 基于模糊灰关联投影法的深基坑支护方案优选[J]. 岩土力学, 2011, 32(s1): 438-444.
WEI Xinjiang, YU Yin, ZHANG Shimin. Optimization of supporting schemes for deep foundation pit based on fuzzy grey relation projection method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(s1): 438-444.
- [13] 吕 峰, 崔晓辉. 多目标决策灰色关联投影法及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1): 103-107.
LYU Feng, CUI Xiaohui. Multi-criteria decision grey relation projection method and its application[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2002, 22(1): 103-107.
- [14] 柯宏发, 陈永光, 夏 斌. 一种基于逼近于理想灰关联投影的多目标决策算法[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1757-1761.
KE Hongfa, CHEN Yongguang, XIA Bin. An algorithm of multiple criteria decision-making based on similarity to ideal grey relational projection[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1757-1761.
- [15] DENG Julong. On grey target[J]. The Journal of Grey System, 1999, 11(3): 169-172.
- [16] DENG Julong. Positional target in grey target theory[J]. The Journal of Grey System, 2000, 12(1): 1-8.
- [17] DENG Julong. Definitions on grey target[J]. The Journal of Grey System, 2000, 12(1): 34-41.
- [18] BEHZADIAN M, OTAGHSARA S K, YAZDANI M, et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(17): 13051-13069.
- [19] 李彦斌, 于心怡, 王致杰. 采用灰色关联度与 TOPSIS 法的光伏发电项目风险评价研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1515-1517.
LI Yanbin, YU Xinyi, WANG Zhijie. Risk assessment on photovoltaic power generation project by grey correlation analysis and topsis method[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1515-1517.
- [20] 杨晓东, 李庚银, 周 明, 等. 基于交互式逼近理想解排序法的电压暂降治理投资最优分配策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 27-30.
YANG Xiaodong, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Based on the interactive approach ideal solution ranking method of voltage sag management investment optimal allocation strategies[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 27-30.
- [21] TRRAINTAPHYLLOU E, SABCHEZ A. Sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making methods[J]. Decision Sciences, 1997, 28(1): 151-187.
- 陈冬鹤(1983—), 男, 满族, 硕士, 助教, 研究方向为电力电子技术。
- 苏浩益(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统最优运行与规划、智能电网。
- 王宗耀(1981—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统最优运行与规划。

(上接第 157 页)

- CHEN Yong, WU Yanhui. Simulation and analysis of control system of HVDC based on PSCAD/EMTDC[J]. Electric Power Science and Engineering, 2008, 24(9): 10-13.
- [16] 何怡刚, 祝文姬, 周炎涛, 等. 基于粒子群算法的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2010, 6(6): 163-171.
HE Yigang, ZHU Wenji, ZHOU Yantao, et al. An analog circuit diagnosis method based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 6(6): 163-171.
- [17] 黄少荣. 粒子群优化算法综述[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(8): 1977-1980.
HUANG Shaorong. Survey of particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(8): 1977-1980.
- 刘 晶(1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为二次检修。
- 翁公羽(1987—), 男, 本科, 主要研究方向运行检修。
- 付 华(1962—), 女, 博士生导师, 主要研究方向为计算机智能检测技术。