

一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法

胡文平¹, 于腾凯¹, 巫伟南²

(1. 国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 电网综合风险评估能有效提高电网安全运行水平, 为电力系统可靠运行提供安全保障。提出了一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法。将云理论应用于输变电设备故障不确定推理预测, 构建基于条件云发生器的云语言预测规则, 在此基础上提出了基于云推理的输变电设备故障率预测模型。同时, 基于效用理论构建了一套包括电压越限、极限输送功率、潜在连锁故障和系统稳定指数的电网综合风险评估指标体系。该方法能够科学合理地电网进行综合风险评估, 扫描电网运行薄弱环节。结合某地区电网运行实际数据进行了计算分析, 计算结果表明该方法有效且实用。

关键词: 正态云模型; 不确定推理; 故障率预测; 效用理论; 风险评估

A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model

HU Wenping¹, YU Teng kai¹, WU Weinan²

(1. State Grid Hebei Electric Power & Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Comprehensive power grid risk assessments can effectively improve the management level and strengthen the security of power grid operation, to ensure reliable operation of the power system. This paper raises a comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model. First, the cloud theory is used in power transmission equipment failure prediction to build prediction rule based on cloud generator. On the basis of the prediction rule, a cloud-based power transmission equipment failure rate prediction model is built. And a power grid assessment system is raised based on utility theory, including over limited voltage index, limit transmission power index, potential cascading failure index, and system stability index. The assessment method could be used to estimate the comprehensive risk of power grid in order to scan the weakness in grid operation. Finally, the effectiveness and practicality of the power grid risk assessment method based on cloud prediction model is verified by an actual case.

Key words: normal cloud model; uncertain reasoning; failure rate prediction; utility theory; comprehensive assessment

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0035-08

0 引言

电网规模的不断扩大、结构日益复杂是当前电网发展的主要特点^[1]。输变电设备是电力系统的重要组成部分, 其故障不仅会影响社会效益, 还将严重影响国民生活, 造成严重的社会影响。因此, 基于输变电设备故障率预测进行电网综合风险评估具有重要意义。电网综合风险的根源在于输变电故障发生的概率特征, 完整的风险评估应该包含输变电设备故障的可能性和其造成后果的严重程度。

输变电设备故障可能性与负载情况、服役年限以及气候变化等外部随机因素相关。文献[2-4]构建

的设备故障率模型考虑了负载潮流、天气和外部条件的影响, 然而随着输变电设备状态检修的开展, 这些方法模型未能利用设备状态评价数据, 难以满足电网状态检修的发展需求。文献[5]针对输变电设备的状态检修, 建立了一套设备可靠性评估数学模型。文献[6-7]建立了以设备健康指数为自变量的指数型函数模型及相关分析改进模型。但输变电设备故障发生具有随机性, 其故障率与健康指数关系具有模糊性, 用确定的指数型函数表示并不恰当, 用泛正态分布描述故障率分布更符合客观实际。而传统的故障严重度采用自定义的线性函数来反映元件故障后的严重程度, 但是这些方法不能够很好地比

较高损失、低概率与低损失、高概率风险间的差异^[8-9]，而实际上前者的风险更大。

云理论是对传统模糊集理论的一种发展和创新。自从 1995 年提出以来，已经被成功地应用于许多领域，包括智能控制、知识表示、数据挖掘、效能评估和可靠性评估等^[10]。在电力系统中，文献^[11]将云理论应用于供电企业安全评价中，对企业的安全现状作出综合评价。目前云模型用于预测已经很常见，已应用于农业产业用水供求预测、弹药消耗预测等^[12]。本文将云理论应用于输变电设备故障不确定推理预测，构建基于条件云发生器的云语言预测规则，在此基础上提出了基于云推理的输变电设备故障率预测方法。同时，基于效用理论构建了一套包括电压越限、极限输送功率、潜在连锁故障和系统稳定指数的电网综合风险评估指标体系。该方法能够科学合理地电网进行综合风险评估，扫描电网运行薄弱环节。

1 云模型理论

1.1 云的基本概念

云理论是完成定性与定量概念之间转换的一种处理不确定问题的理论^[13]，它反映了人类认知过程中的不确定性：随机性(事件发生的可能性)和模糊性(边界的亦此亦彼性)。

设 U 是一个用精确定量数值表示的论域 $U = \{x\}$ 。 T 是与 U 相对应的定性概念，若 U 中元素 x 对 T 的确定度 $u(x)$ 为具有稳定倾向的随机数，则 $u(x)$ 在论域上 U 的分布就称为隶属云，简称云。其中， $u(x)$ 取值范围为 $[0,1]$ ，云是指从论域 U 到区间 $[0,1]$ 的映射，即

$$u(x): U \rightarrow [0,1], \forall x \in U_x \rightarrow u(x) \quad (1)$$

云具有 3 个数字特征量，分别为期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 。期望是最能代表定性概念的点，反映云滴的重心，也是概念量化时最典型的样本点；熵用以度量定性概念的不确定性，反映了代表性概念的云滴的离散程度；超熵是熵的熵，用以度量熵的不确定性，反映了云滴的凝聚度。图 1 给出了一维正态云的数字特征示意图。

1.2 云发生器

云发生器(Cloud generator, CG)，即云的生成算法，其核心技术是用中心极限定理生成正态随机数，既可以通过软件的方式实现，也可以固化为硬件实现^[14]。

若给定论域 U_1 中一个特定数值 x ，通过云发生器生成该特定值 x 属于定性概念 C_1 的确定度分布，

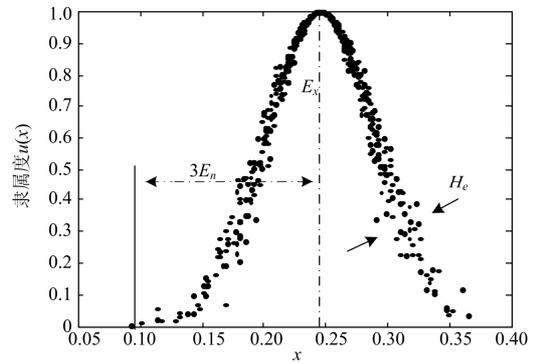


图 1 云的数字特征示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cloud's digital features

此时的云发生器为 X 条件云发生器；若给一特定的确定度 $u(x) \in [0,1]$ ，通过云发生器生成论域 U_2 中的概念 C_2 满足对应该确定度下云滴的分布，这时的云发生器称为 Y 条件云发生器。 X 条件云和 Y 条件云发生器原理如图 2 所示。

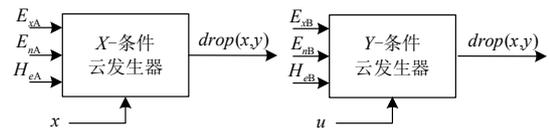


图 2 条件云发生器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of condition cloud generator

2 基于云推理的设备故障率预测模型

云推理预测的基本思想为：首先分析提取影响预测对象的相关定性概念，建立对应的语言预测规则；然后结合逆向云发生器生成相应概念的不确定云模型；最后，结合具体情况，根据条件云发生器构造不确定性推理规则，建立基于云推理的输变电设备故障率预测模型。

2.1 基于云模型的语言预测规则

云模型可以有效地实现定量数值与对应定性概念之间的转换，且可以通过相应规则发生器对定性概念进行表征并实现不同概念间的不确定推理。图 3 给出了基于条件云发生器的云语言预测规则。

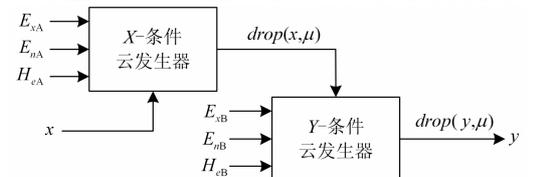


图 3 基于不确定推理的云语言预测规则图

Fig. 3 Rules of uncertainty prediction based on cloud models

图 3 中 X -条件云发生器和 Y -条件云发生器之间相互连接便构成了相应的云语言预测规则，其对应算法如下。

- 1) 根据 X 条件云发生器定性的概念 $C_A(E_{xA}, E_{nA}, H_{eA})$ 产生一个正态分布随机数 $E'_{nA} = \text{norm}(E_{nA}, H_{eA}^2)$;
- 2) 计算 X 条件云发生器特定输入值 x 的隶属度 $u = \exp[-(x - E_{xA})^2 / 2(E'_{nA})^2]$;
- 3) 根据 Y 条件云发生器的定性概念 $C_B(E_{xB}, E_{nB}, H_{eB})$ 产生一个正态分布随机数 $E'_{nB} = \text{norm}(E_{nB}, H_{eB}^2)$;
- 4) 计算特定输入值 x 的输出。若 $x < E_{xA}$, 则输入处于条件云上升沿, 此时 $b = E_{xB} - E'_{nB} \cdot \sqrt{-2 \ln u}$; 反之则处于下降沿, $b = E_{xB} + E'_{nB} \cdot \sqrt{-2 \ln u}$ 。

在实现定性概念 $C_A(E_{xA}, E_{nA}, H_{eA})$ 到定性概念 $C_B(E_{xB}, E_{nB}, H_{eB})$ 的不确定性推理时, 对于论域 U_A 中特定输入值 x , X 条件云发生器随机产生其对应的确定度 u , 并将定性概念 A 的不确定性传递到论域 U_B 中, Y 条件云发生器在确定度 u 的控制下产生并输出一个随机云滴 $\text{drop}(b, u)$, 所以 Y 条件云的输出值 b 也具有不确定性, 即实现了云推理过程中不确定性的传递。

2.2 输变电设备故障预测相关概念的云模型表示

输变电设备常见的故障分布形式主要包括指数分布、正态分布以及伽马分布等, 而泛正态分布更能反应状态检修与故障率之间的模糊随机关系。因此, 本文采用一维正态云模型进行输变电设备故障率预测。

进行输变电设备故障预测, 需要输入输变电设备的历史数据, 利用逆向云发生器构建反映设备健康状态和故障可能性两个相关定性概念的云。若输入数据大于 10 组时, 得到的期望值精确度高, 误差小^[15]。因此, 本文采用前 10 年的设备健康指数及可靠性数据。

设 X 为设备故障率最大值对应年份的设备健康指数统计均值, $u(x)$ 为设备某一健康指数值 x_i 隶属于故障率最大年份里健康指数平均值 X 的程度, 由此得健康指数的隶属度计算方法为

$$u(x) = \begin{cases} x_i / X & \text{当 } x_i < X \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } x_i \geq X \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

为了建立对应状态下的故障趋势云, 假定 $p_i (i=1, 2, \dots, 10)$ 为该地区对应电压等级设备前 10 年的故障率, P 为设备历年来的最大故障率, $u(p)$ 为某一年故障率 p_i 隶属于历年故障率最大值 P 的程度, 有

$$u(p) = \begin{cases} p_i / P & \text{当 } p_i < P \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } p_i \geq P \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

利用逆向云发生器, 输入上述历史数据及相应隶属度, 生成各自的 3 个云模型数字特征, 便可得到以表征相应的输变电设备的健康状态的状态关联云 $C_A(E_{xA}, E_{nA}, H_{eA})$ 及表征故障发生可能性的故障趋势云 $C_B(E_{xB}, E_{nB}, H_{eB})$ 。

逆向云发生器的算法如下:

- 1) 根据正态云期望曲线方程 $y = \exp[-(x - E_x)^2 / 2E_n^2]$, 将已知云滴拟合, 从而得到 E_x^Λ ;
- 2) 将 $y > 0.999$ 的点剔除, 剩下 m 个云滴;
- 3) 由 $E'_n = \frac{|x - E_x^\Lambda|}{\sqrt{-2 \ln y}}$, 求出 E'_n ;
- 4) 根据 $E_n^\Lambda = \sum_{i=1}^m E'_n / m$, 求出 E_n^Λ ;
- 5) 由 $H_e^\Lambda = \sqrt{\sum_{i=1}^m (E'_{ni} - E_n^\Lambda)^2 / (m-1)}$, 得到 H_e^Λ 。

2.3 基于云不确定性推理的设备故障率预测

将状态关联云 $C_A(E_{xA}, E_{nA}, H_{eA})$ 和故障趋势云 $C_B(E_{xB}, E_{nB}, H_{eB})$ 作为 X 条件云和 Y 条件云对应的定性概念云, 根据 2.1 节的云推理规则, 实现输变电设备故障率推理预测。具体计算流程如图 4 所示。

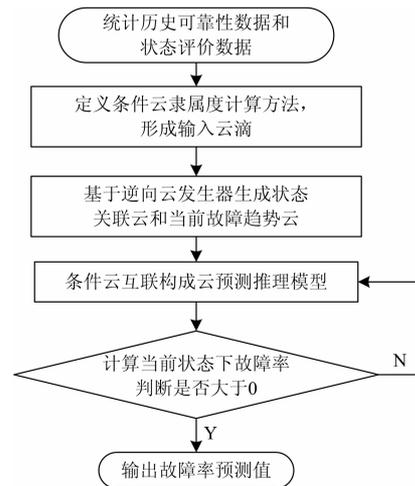


图 4 基于云模型的输变电设备故障率预测流程图
Fig. 4 Flow chart of equipment's failure rate prediction based on cloud model

3 基于效用理论的电网综合风险评估

3.1 基于效用函数的电网风险评估方法

输变电设备有多种类型, 本文针对输电线路故障对电网影响进行综合风险评估。设 w 为输电线路故障的损失值, $S(w)$ 为电力系统元件故障损失的效用函数, 亦即故障损失带来的不满意程度, 用 $S(w)$ 表示故障的严重程度。

风险偏好型效用函数满足 $S'(w) > 0$ 、 $S''(w) < 0$ 的要求, 即故障损失增加, 不满意程度增加, 不满意程度增加速度加快, 这符合系统运行人员对故障后果的态度, 贴近电力系统的实际情况。因此, 本文采用风险偏好型效用函数表征故障严重度(取 $\gamma=1$)。

$$S(w) = 0.582(e^w - 1) \quad (4)$$

风险指标定义为事故的概率与事故后果的乘积^[16]。

$$R = P \cdot 0.582(e^w - 1) \quad (5)$$

式中: R 为输电线路风险指标值; P 为输电线路故障发生概率; w 为输电线路故障的损失值。

将指标值经过归一化后, 分别利用层次分析法和熵值法计算各个风险指标的主客观组合权重, 对电网风险进行综合评估^[17-18]。

3.2 四项风险子指标计算方法

传统的电压越限指标不考虑越限持续时间对故障后果的影响^[19], 一般文献^[20]只用过负荷指标来表征线路过载情况, 但未能表征其发生连锁故障的潜在风险。因此, 本文分别从经济性、安全性等角度出发, 参考文献[21-23]定义了电压越限、极限输送功率、潜在连锁故障和系统稳定指数共 4 个风险评价指标, 分别从电压稳定、静态安全、连锁故障、暂态安全风险等四个方面来全面地评估电网风险。

3.2.1 电压越限指标

电压越限反映了事故发生时系统因主要母线电压值偏离正常运行水平而面临的电压崩溃风险。考虑到故障持续时间对故障后果有较大影响, 即同样的电压偏离, 持续时间越长, 故障后果越严重, 此指标为负向指标。本文评估对象为输电线路, 需研究输电线路两端电压越限情况, 因此, 定义考虑故障时间积分的电压越限风险指标为

$$w_{VOL} = \left(\int_0^{t_0} |\Delta V_{ia}| dt + \int_0^{t_0} |\Delta V_{ib}| dt \right) / 2 \quad (6)$$

式中, ΔV_{ia} 和 ΔV_{ib} 为线路两端的母线电压偏离值。

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_i - 1.05 & V_i > 1.05 \\ 0.95 - V_i & V_i < 0.95 \\ 0 & 0.95 \leq V_i \leq 1.05 \end{cases} \quad (7)$$

3.2.2 极限传输功率指标

本文的输电线路极限传输功率计算只考虑静态稳定性约束, 即正常运行方式断开该条线路, 其余线路潮流均不过载, 其余节点电压不越限。满足该约束下的最大传输功率就是该线路的极限传输功率, 记为 P_{max} 。参考静态稳定储备系数, 定义极限

传输功率指标 w_{MTC} 为

$$w_{MTC} = (P_{max} - P_0) / P_0 \quad (8)$$

式中: P_{max} 为线路的极限传输功率; P_0 为正常运行时该线路的传输功率, 均由仿真软件计算求得。线路极限传输功率越大, 稳定裕度就越大, 线路故障导致系统失稳的概率应越小, 为正向指标。

3.2.3 潜在连锁故障指标

当系统中某一输电线路发生故障时, 电力传输路径会因此遭到破坏而使得系统潮流发生转移, 此时可能造成系统其他非故障线路相继过载而发生保护误动, 最终因并行输电断面遭到破坏而发生连锁故障。根据连锁故障事故机理, 本文定义了潜在连锁故障指标, 用以表征输电线路故障退出运行时系统所面临的连锁故障潜在风险, 此指标为负向指标, 具体定义为

$$\omega_{PCF} = \begin{cases} 0 & 0 \leq L_i \leq L_0 \\ (L_i - L_0 + \Delta I_i)_{\max} & L_i > L_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: L_0 为非故障线路 i 因线路故障而面临保护误动作风险的负载率门槛值; L_i 为非故障线路 i 在故障线路退出运行后的负载率; ΔI_i 为故障线路退出运行后非故障线路 i 负载率相对正常情况时的变化值。

3.2.4 系统稳定指数指标

输电线路发生故障时, 相当于给系统施加了一个大的扰动, 此时系统中主要发电机组的动能会发生急剧变化, 当这一变化超出了系统所能吸收的临界能量时, 系统表现为不稳定。为了从系统角度对输电线路故障时电网的总体风险进行分析, 定量评估对应的系统暂态稳定破坏程度, 此指标为负向指标。本文引入系统稳定指数风险指标, 具体定义为

$$w_{SS}(\text{sec}) = \int_0^T \left| \frac{d}{dt} W_{\text{total}} \right| dt / W_b \quad (10)$$

其中,

$$W_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} J_i \omega_{mi}^2 \quad (11)$$

本指标是在电力公司提供的稳态潮流基础上进行仿真计算, 仿真设置为线路因发生故障而在仿真开始后 50 个周波时退出运行。这里, T 为仿真时间; i 是发电机编号, N 为待评估的系统中总的发电机数量; W_{total} 为系统发电机总能量; W_b 为稳定指数基准值; J_i 为发电机转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), ω_{mi} 为转子机械角速度 (rad/s)。

4 算例分析

以某省级电网 2013 年夏季最大运行方式为例,

选取关键 220 kV 输电线路,对基于云预测模型的电网综合风险评估方法进行校验和分析。

4.1 输电线路故障率计算

表 1 和表 2 分别给出该地区过去历年来输电线路健康指数和故障率以及计算得到的相应隶属度数据。下面以该地区孙容线为例说明具体预测过程,用 2002~2011 年十年间的数据预测 2012 年的线路故障率,然后将预测结果与实际故障率作比较。

表 1 该地区 220 kV 线路历年健康指数均值统计情况

Table 1 Statistics data of 220 kV transmission line's average health index

年份/a	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
健康指数 x	22	21	24	27	22	25	32	21	20	22
隶属度 $\mu/\%$	63	60	69	77	63	71	91	60	57	63

表 2 该地区 220 kV 线路历年平均故障率统计情况

Table 2 Statistics data of 220 kV transmission line's average failure rate

年份/a	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
故障率/ (次/百公里年)	0.162	0.188	0.234	0.354	0.276	0.307	0.556	0.247	0.233	0.185
隶属度 $\mu/\%$	29	34	42	63	49	55	99	44	42	33

按照前面所述方法计算得到该地区输电线路健康指数状态关联云和当前故障趋势云分别为 $C_A(23.6,4.026,0.298)$ 和 $C_B(0.274,0.274,0.020)$ 。由于云模型中某一个云滴只是对应定性概念的一次量化实现,云滴越多,才越能反映相应定性概念的整体特征,这里根据云的数字特征随机生成 500 个预测云滴,得到对应的云散点分布分别如图 5 和图 6 所示。

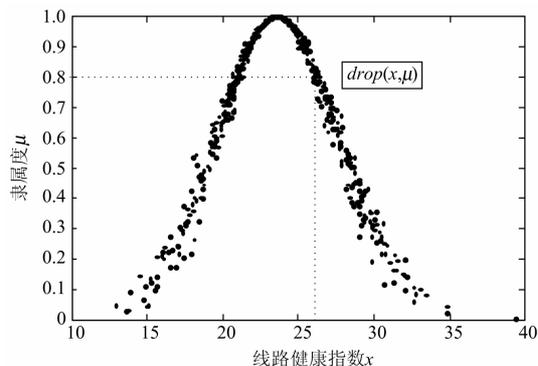


图 5 输电线路健康指数状态关联云散点分布图
Fig. 5 Scatter distribution diagram of health index's associated state cloud

从图中可知,线路历年健康指数期望值与故障率期望值是对应的,即线路健康指数为 23.6 时,对应最有可能出现的故障率为 0.274 次/百公里年。

孙容线 2012 年的健康指数值为 $x=16$,将孙容线当前健康指数值输入 X -条件云时,随机生成对应该状态下最可能的模糊隶属度为 0.948,将该值传递给 Y -条件云作为其输入,由于 $x < E_{x_A} = 23.6$,所以在故障趋势云中找到的上升沿并计算得相应故

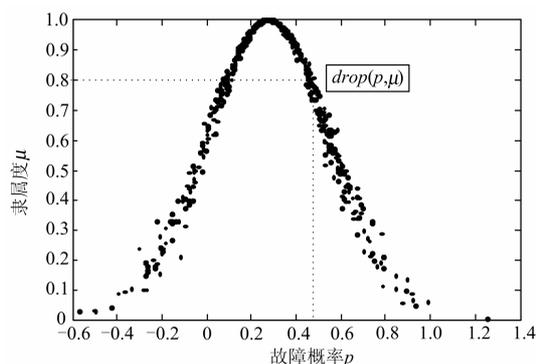


图 6 输电线路当前故障趋势云散点分布图

Fig. 6 Scatter distribution diagram of the current fault trend cloud

障率预测值为 0.185 次/百公里年,即健康指数为 16 时最可能出现的故障率。由于每一次推理预测过程都是不确定的,当程序运行 1 000 次的均值稳定收敛,因此取 1 000 次结果的平均值作为线路对应的故障率预测值,最终孙容线的故障率预测值为 0.186 次/百公里年。孙容线 2012 年实际故障率是 0.169 次/百公里年,预测误差为 9.88%。

按照上述方法,表 3 给出了该地区主要 220 kV 线路故障率预测分析结果。

4.2 电网运行风险综合评估

计算电网各风险子指标,由于指标体系含有正向指标和负向指标,需要经过归一化处理(0-1 之间,越小越好),结果如表 4 所示。运用层次分析法和熵值法计算出指标间的主客观权重,其中,在主客观权重中本文认为四个指标同等重要。主客观权重计算结果如表 5 所示。

表 3 该地区主要 220 kV 线路故障率预测结果

Table 3 Prediction results of the main transmission lines failure rate in this region

线路名称	线路长度/km	当前线路	
		健康指数	线路故障率 预测值/(次/年)
安铜 I 线	21.404	21	0.053 0
东束线	24.598	22	0.064 2
孙容线	32.665	19	0.073 6
沧姚 I 线	36.448	20	0.086 5
柏宁线	25.271	17	0.051 2
车固二线	32.743	22	0.085 4
邯玉线	45.028	20	0.106 7
大魏线	31.72	18	0.067 5
武马 I 线	20.608	23	0.056 2
范金线	44.421	17	0.089 6

表 4 输电线路各风险子指标值

Table 4 Risk index value of the transmission lines

线路名称	电压越限	极限输送功率	潜在连锁故障	稳定指数
安铜 I 线	1.000 0	0.382 1	0.855 4	0.452 8
东束线	0.834 2	0.621 1	0.230 9	1.000 0
孙容线	0.664 7	0.296 3	1.000 0	0.765 0
沧姚 I 线	0.623 5	1.000 0	0.153 5	0.577 2
柏宁线	0.197 2	0.353 4	0.097 8	0.264 9
车固二线	0.334 4	0.244 2	0.199 0	0.520 9
邯玉线	0.399 7	0.580 3	0.173 8	0.407 0
大魏线	0.190 6	0.508 9	0.115 2	0.285 4
武马 I 线	0.270 2	0.940 5	0.445 6	0.155 8
范金线	0.391 0	0.522 3	0.179 0	0.354 2

表 5 电网风险评估的指标权重

Table 5 Weights of the grid risk assessment indexes

风险指标	客观权重	主观权重	组合权重
电压越限	0.204	0.250	0.227
极限输送功率	0.138	0.250	0.194
潜在连锁故障	0.483	0.250	0.366
系统稳定指数	0.175	0.250	0.213

基于以上的风险子指标和组合权重，利用模糊综合评价法对电网运行风险进行综合评估，所得的综合风险指标值如表 6 所示。

4.3 结果分析

计算结果表明，输电线路故障率预测结果符合该地区电网实际可靠性数据统计规律，预测误差小于 10%，本文中的故障率预测主要应用于风险评估，精度满足要求，而由文献[15]可知，随着原始统计数据增加，云预测的精确度会进一步提升。因此，

表 6 输电线路综合风险指标值

Table 6 Integrated risk index values of the transmission lines

线路名称	故障率/(次/年)	电网风险综合指标值
安铜 I 线	0.053 0	0.710 836
东束线	0.064 2	0.607 059
孙容线	0.073 6	0.737 357
沧姚 I 线	0.086 5	0.514 545
柏宁线	0.051 2	0.205 476
车固二线	0.085 4	0.306 924
邯玉线	0.106 7	0.353 539
大魏线	0.067 5	0.244 893
武马 I 线	0.056 2	0.440 253
范金线	0.089 6	0.330 98

基于云推理的设备故障率预测模型在输电线路故障率预测中具有正确性和有效性。尽管邯玉线故障率明显高于孙容线，但故障严重度却低于孙容线，最终孙容线故障退出运行时给系统带来的综合运行风险明显高于其他线路，需要进行重点维护和管理。同时，也说明了效用函数理论在用以评估电网运行风险时，可以有效区分高损失、低概率与低损失、高概率这两种风险，为运行人员提供较好的指导依据。

5 结论

本文提出一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法。输变电设备故障率会受到很多不确定性因素的影响，具有随机性和模糊性，本文将云理论应用于输变电设备故障不确定推理预测，构建基于条件云发生器的云语言预测规则，在此基础上建立了基于云推理的输变电设备故障率预测模型。为区分高损失、低概率与低损失、高概率这两种风险，采用效用理论构建了一套包括电压越限、极限输送功率、潜在连锁故障和系统稳定指数的电网综合风险评估指标体系。该风险评估方法能够科学合理地预测输变电设备故障率，全面客观地对电网进行综合风险评估，扫描电网运行薄弱环节，有助于维持电力系统安全可靠运行。

参考文献

- [1] 林圣, 何正友, 钱清泉, 等. 输电网故障诊断方法综述与发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 140-150.
- LIN Sheng, HE Zhengyou, QIAN Qingquan, et al. Review and development on fault diagnosis in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2010,

- 38(4): 140-150.
- [2] 程林, 何剑, 孙元章, 等. 线路实时可靠性模型参数对电网运行可靠性评估的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 8-13.
CHENG Lin, HE Jian, SUN Yuanzhang, et al. Impact of transmission line's real-time reliability model parameter upon power system operational reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 8-13.
- [3] 张国华, 张建华, 彭谦, 等. 电网安全评价的指标体系与方法[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 30-34.
ZHANG Guohua, ZHANG Jianhua, PENG Qian, et al. Index system and methods for power grid security assessment[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 30-34.
- [4] XIAO F, MCCLLEY J. Contingency probability estimation using weather and geographical data for on-line security assessment[C] // Proc Int Conf Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006.
- [5] 吴宏斌, 盛继光. 继电保护设备可靠性评估的数学模型及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 65-68.
WU Hongbin, SHENG Jiguang. Mathematical model and its application of relaying protection device reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 65-68.
- [6] 宋卓然, 刘东, 尤毅, 等. 考虑设备健康状态的智能调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 43-47.
SONG Zhuoran, LIU Dong, YOU Yi, et al. Intelligent dispatching strategy considering the health condition of power equipments[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 43-47.
- [7] 潘乐真, 张焰, 俞国勤, 等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 91-94.
PAN Lezhen, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 91-94.
- [8] 王安斯, 罗毅, 涂光瑜, 等. 用于预防控制的电力系统连锁故障事故链在线生成方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2446-2451.
WANG Ansi, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Online determination method of fault chains of power system cascading failure available for preventive control[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2446-2451.
- [9] 张国华, 段满银, 张建华, 等. 基于证据理论和效用理论的电力系统风险评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 1-4, 47.
ZHANG Guohua, DUAN Manyin, ZHANG Jianhua, et al. Power system risk assessment based on the evidence theory and utility theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 1-4, 47.
- [10] 廖良才, CARMICHAEL D. 基于云理论和效用理论的评估方法及其在业主评估中的应用[J]. 系统工程, 2010, 28(8): 39-45.
LIAO Liangcai, CARMICHAEL D. Evaluation method based on cloud theory and utility theory and its application in owner evaluation[J]. Systems Engineering, 2010, 28(8): 39-45.
- [11] 马丽云, 施泉生. 基于云重心理论的供电企业安全评价方法[J]. 华东电力, 2011, 39(8): 1370-1373.
MA Liyun, SHI Quansheng. Safety assessment method for electric power supply corporations based on cloud barycenter theory[J]. East China Electric Power, 2011, 39(8): 1370-1373.
- [12] 叶琼, 李绍稳, 张友华, 等. 云模型及应用综述[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(12): 4198-4201.
YE Qiong, LI Shaowen, ZHANG Youhua, et al. Cloud model and application overview[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(12): 4198-4201.
- [13] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [14] 李德毅, 孟海军. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
LI Deyi, MENG Haijun. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20.
- [15] 周辅疆, 朱小冬, 程永伦. 云模型在训练弹药消耗预测中的应用研究[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(10): 57-59.
ZHOU Fujiang, ZHU Xiaodong, CHENG Yonglun. Application of cloud models in prediction of training ammunition expense[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(10): 57-59.
- [16] 肖盛. 基于风险理论的电网脆弱性评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
XIAO Sheng. Power grid vulnerability assessment based on risk theory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

- [17] 尹项根, 陈庆前, 王博, 等. 基于四层集合模型的复杂电力系统脆弱性评估体系[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 225-233.
YIN Xianggen, CHEN Qingqiang, WANG Bo, et al. Vulnerability assessment system of complicated power system based on four-level set model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 225-233.
- [18] 马丽叶, 卢志刚, 胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.
MA Liye, LU Zhigang, HU Huawei. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171.
- [19] 李隽, 赵一婕, 吴军, 等. 基于线路退运的静态安全风险评估指标模型[J]. 电力建设, 2013(1): 21-24.
LI Jun, ZHAO Yijie, WU Jun, et al. Index model of static security risk assessment based on line outage[J]. Electric Power Construction, 2013(1): 21-24.
- [20] 刘若溪, 张建华, 吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-95.
LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, WU Di. Research on static security index of distribution network based on risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 89-95.
- [21] 李响, 郭志忠. 基于 $N-1$ 原则的输电断面传送功率能力分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 28-30, 35.
LI Xiang, GUO Zhizhong. Analysis of network transmission capability based on $N-1$ principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 28-30, 35.
- [22] 王安斯, 罗毅, 涂光瑜, 等. 用于预防控制的电力系统连锁故障事故链在线生成方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2446-2451.
WANG Ansi, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Online determination method of fault chains of power system cascading failure available for preventive control[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2446-2451.
- [23] ALI M H. Transient stability enhancement by fuzzy logic-controlled SMES considering coordination with optimal reclosing of circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 631-640.
-
- 收稿日期: 2014-05-06; 修回日期: 2014-10-13
- 作者简介:
- 胡文平(1968-), 男, 博士, 高工, 主要研究领域为电网分析与计算、电能质量和分布式能源;
- 于腾凯(1982-), 男, 工程师, 主要研究领域为电力系统运行、电能质量分析与控制;
- 巫伟南(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统风险评估. E-mail: vigor_wu@whu.edu.cn
- (编辑 姜新丽)