

考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系

巫伟南¹, 杨 军¹, 胡文平², 曾志力¹, 于腾凯², 刘 培¹

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

摘要: 输电线路在电力系统中承担着输送电力的重要任务, 其故障特性具有随机性和模糊性, 对电网安全运行具有重大影响。提出一种考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系, 建立基于云模型的输电线路故障概率预测模型, 由输电线路状态评估数据生成正态分布云滴, 从而预测输电线路故障概率; 基于效用理论构建一套包括广义负荷损失、潜在连锁故障、电压越限和系统稳定指数的电网综合风险评估指标体系, 能够扫描电网运行薄弱环节。以实际电网为算例, 验证了考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系的有效性和实用性。

关键词: 电力系统; 输电; 预测; 云预测模型; 效用理论; 风险评估; 层次分析法; 熵值法; 故障分析
中图分类号: TM 732 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.022

0 引言

电网规模的不断扩大化以及系统元件的不断复杂化是当前电网发展的主要特点。输电线路是电力系统中重要的组成部分和输电系统的命脉, 其故障不仅影响电网输电能力, 还可能引起电力系统的大规模停电, 造成巨大损失。因此, 考虑输电线路故障特性进行电网综合风险评估, 进而找出其运行薄弱环节, 这对于电力系统的安全运行和降低运行维护成本具有重要意义。

电力系统运行安全评估研究经历了确定性评估方法、概率评估方法和风险评估方法 3 个主要阶段^[1], 目前风险评估方法能够定量评价事故的可能性和严重性 2 个重要因素, 因而得到了广泛应用。在事故可能性方面, 输电线路故障发生的不确定性包括模糊性和随机性, 而人类的思维是以模糊性为其本质的, 因此主要面对的问题是如何准确描述输电线路故障概率。文献[2-3]采用传统的可靠性统计方法来确定输电线路的故障概率。文献[4-5]将输电线路故障的可能性看作随机模糊数, 基于可信性理论计算了随机模糊数的期望值, 但没有考虑设备运行状态变化对故障概率的影响。文献[6]采用设备健康指数来评估输变电设备的运行状态, 并基于健康状态采用指数模型预测设备的故障概率。由文献[7-8]可知, 单纯用指数关系来进行拟合时可能会导致在某一健康指数以下的故障率超过 1 且计算误差大。不同国家及不同电力企业对设备健康状态评分时采用的评价模型是有区别的^[9], 如何实现由设备状态定性评价到定量故障率数据间的转化仍然是一个难题。另外, 上述方法均未利用设备状态评价数据, 因而难以满足当前电网状态检修的发展需要。在严重性方面, 电力系统是一个不断变化的系统, 现有研究

一般仅就系统运行风险中的某一方面进行重点分析, 或者将一些典型的直接损失风险整合并进行相应的电网综合风险评估分析, 缺少对故障蔓延可能性的评价^[10], 具有一定局限性。

本文建立了考虑输电线路故障特性的电网风险评估体系, 利用云模型处理输电线路故障的模糊性和随机性, 有效地将输电线路状态的定性评价转换成故障概率的定量预测; 同时, 引入效用理论的概念, 考虑故障蔓延可能性以及系统稳定性, 构建包含广义负荷损失、潜在连锁故障、电压越限和系统稳定指数的电网风险评估指标体系, 结合模糊综合评价法、层次分析法和熵值法对电网运行风险进行综合评估, 最终找出电网运行薄弱环节。

1 基于云理论的输电线路故障概率预测模型

1.1 云模型理论概述

云是利用语言值表示某个定性概念与其定量表示之间不确定性转换模型。它主要反映客观世界中事物或人类知识中概念的 2 种不确定性: 模糊性(边界的亦此亦彼性)和随机性(发生的概率), 并把两者完全集成在一起, 构成定性和定量相互的映射^[11-12]。

定义论域 U 为一个用精确数值表示的集合 $U = \{x\}$ 。 T 是与 U 相联系的定性概念。若 U 中元素 x 对 T 的隶属度 $u(x)$ 是具有稳定倾向的随机数, 则 $u(x)$ 在论域 U 上的分布称为隶属云, 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:

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

映射 $u(x)$ 称为 T 的云模型, 其中的每一个 x 称为一个云滴。

云模型用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 3 个数字特征来表征概念的整体特性。其中, 期望 E_x 是最能够代表这个定性概念的点, 反映在运行上就是云的“最高

点”,即隶属度为 1 的点;熵 E_n 则用以反映云模糊性和随机性的大小,表示云的“跨度”,即熵越大,云的“跨度”越大;超熵 H_e 用来反映云滴的凝聚度,反映在云形上表示云的“厚度”,超熵越大,“厚度”越大。

1.2 云模型预测输电线路故障概率

1.2.1 输电线路正态云预测模型

电气设备的健康指数指的是设备相应的状态劣化程度,具体而言就是基于《输变电设备状态检修试验规程》以及相关设备的状态评价导则对设备基础状态量进行采集和处理得到各部件的扣分值,继而得到设备的综合扣分值作为设备的健康指数,其值介于 0~100 之间。

设 $u(x)$ 为输电线路在某一年对应的健康指数 H_i 隶属于故障停运时最大健康指数均值 H 的程度,由此得到云预测模型中输电线路健康指数的隶属度计算方法如下:

$$u(x)=\begin{cases} H_i/H & H_i<H \\ 1 & H_i\geq H \end{cases} \quad (2)$$

同时,将对应输电线路过去十年的平均故障概率数据 $\{p_1,p_2,p_3,p_4,p_5,p_6,p_7,p_8,p_9,p_{10}\}$ 作为输入,与待预测输电线路的健康指数隶属度数据 u_i 对应起来,得到一定数量的云滴 $\text{drop}(p_i,u_i)$,然后通过一维逆向云发生器来得到描述定性知识的云的 3 个数字特征。根据曲线拟合的方法得到云的数字特征,利用一维逆向发生器生成预测模型,具体算法如下:

a. 根据正态云期望曲线 $u(x)=e^{-(x-E_x)^2/(2E_n^2)}$ 拟合得到期望 E_x 的估计值 $\hat{E}_x$,将 $u(x)>0.999$ 的点剔除,剩下 m 个云滴, E_x 、 E'_n 分别为正态云期望曲线的期望和熵;

b. 由 $E'_w=\left|x_i-\hat{E}_x\right|/\sqrt{-2\ln u(x_i)}$ 计算出 E'_w ,并由 $\hat{E}_n=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m E'_w$ 得熵 E_n 的估计值 $\hat{E}_n$;

c. 根据 $\hat{H}_e=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (E'_w-\hat{E}_n)^2}{(m-1)}}$,求得超熵 H_e 的估计值 $\hat{H}_e$ 。

由以上算法便可以准确地估算出云模型的 3 个数字特征并生成输电线路的故障概率预测模型。

1.2.2 预测输电线路故障概率

结合前面所得到的云的 3 个数字特征值(期望 $\hat{E}_x$ 、熵 $\hat{E}_n$ 和超熵 $\hat{H}_e$),利用正态云模型预测输电线路故障概率,具体算法如下:

a. 生成期望为 $\hat{E}_x$ 、方差为 $\hat{H}_e^2$ 的一个正态随机数 E'_w ,即 $E'_w\sim N(\hat{E}_x,\hat{H}_e^2)$;

b. 生成期望值为 $\hat{E}_x$ 、方差为 E'^2_w 的一个正态随机数 x_i ,即 $x_i\sim N(\hat{E}_x,E'^2_w)$;

c. 计算 $u(x_i)=e^{-(x_i-\hat{E}_x)^2/(2E'^2_w)}$;

d. 具有确定度 $u(x_i)$ 的 x_i 成为云模型中的一个云滴 $\text{drop}(x_i,u(x_i))$;

e. 重复以上步骤,直到产生一定数量的预测云滴。

假定由上述预测算法产生了 M 个符合条件的云滴,通过计算所产生的满足要求的预测云滴的故障概率分布均值,可得到输电线路下一年的故障概率。

2 基于输电线路故障特性的电网综合风险评估指标体系

风险指标能够定量地抓住决定风险等级的因素——事故的可能性和严重性,从而比较全面地反映事故对整个系统的影响。输电线路故障带给电网的风险是多方面的,不仅包含负荷损失等直接的风险,同时还将使系统面临潜在运行风险。因此,为了对输电线路不确定性故障所造成的电网综合风险作全面、科学、合理的评估,本文分别从经济性、安全性^[13-16]等角度出发,定义了广义负荷损失、潜在连锁故障、电压越限和系统稳定指数共 4 个风险评价指标。

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,而实际上前者的风险更大,因此本文引入效用函数构建故障严重度模型^[14]。

效用函数的不同形式反映决策者的不同“风险态度”,决策者的“风险态度”一般分为:风险厌恶型、风险中立型和风险偏好型 3 种,对应的效用函数特点如表 1 所示。

表 1 3 种类型效用函数的特点
Tab.1 Features of three utility function types

类型	函数形式	特点
风险厌恶型	$f(x)=\frac{1-e^{-\gamma x}}{1-e^{-\gamma}}$, $\gamma\geq 0$	$f'(x)>0,f''(x)<0$
风险中立型	$f(x)=ax+b$, $a>0$	$f'(x)>0,f''(x)<0$
风险偏好型	$f(x)=\frac{e^{\gamma x}-1}{e^{\gamma}-1}$, $\gamma\geq 0$	$f'(x)>0,f''(x)>0$

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。

电力系统一直坚持安全供电为第一要务,因为系统运行管理人员对故障十分敏感,对故障的不满意程度会随着故障损失增加而增加,即 $S'(w)>0$,同时因担心连锁故障和大面积停电等重大事故的发生,随着故障损失增加,不满意程度增加速度加快,即 $S''(w)>0$ 。

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。因此,本文采用风险偏好型效

用函数表征故障严重度(取 $\gamma=1$),这体现了系统运行人员对故障后果的心理承受能力,贴近电力系统的实际情况。

$$S(w)=0.582(e^w-1) \quad (3)$$

一般将风险定义为事故的概率与事故后果的乘积。采用上述的效用函数,本文的风险指标为:

$$R=p \times 0.582(e^w-1) \quad (4)$$

其中, R 为输电线路风险指标值; p 为输电线路故障发生概率。

2.1 广义负荷损失风险指标

为了从经济性角度对线路故障造成的负荷损失风险进行量化,定义事故后负荷损失率为:

$$w_{FL} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{FC}} S_{FL}^i}{S_{Basic}} \quad (5)$$

其中, S_{FL}^i 为第 i 个损失用户的容量; N_{FC} 为事故时考虑相应转供方案后的所有损失的用户数; S_{Basic} 为自定义的基准容量。

2.2 潜在连锁故障风险指标

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,具体定义如下:

$$\omega_{PCF} = \begin{cases} 0 & 0 \leq L_i \leq L_0 \\ \max(L_i - L_0 + \Delta I) & L_i > L_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, 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 为线路 i 在故障操作完成后的负载率; ΔI 为故障操作完成后非故障线路 i 负载率相对正常情况时的变化值。

2.3 电压越限风险指标

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,因此,本文定义考虑故障时间积分的电压越限风险指标:

$$w_{VOL} = \int_0^{t_0} |\Delta U_i| dt \quad (7)$$

$$\Delta U_i = \begin{cases} U_i - 1.05 & U_i > 1.05 \\ 0.95 - U_i & U_i < 0.95 \\ 0 & 0.95 \leq U_i \leq 1.05 \end{cases}$$

其中, $|\Delta U_i|$ 为母线电压偏离值。

2.4 系统稳定指数风险指标

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,本文引入系统稳定指数风险指标^[16],具体定义为:

$$w_{ss} = \int_0^T \left| \frac{d}{dt} W_{total} \right| dt / W_b \quad (8)$$

$$W_{total} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} J_i \omega_{mi}^2 \quad (9)$$

其中, T 为仿真时间; i 为发电机编号; 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)。

3 电网风险综合评估

有了广义负荷损失、潜在连锁故障、电压越限和系统稳定指数等风险评价指标后,可利用模糊综合评价方法^[17]对电网风险进行综合评估。设向量 $\mathbf{R}' = (R_1, R_2, \dots, R_n)$ 代表上述电网风险评估中的单项风险指标向量, n 为事故集中所有风险指标的总数, R_i 为事故的第 i 个单项风险值,则事故的电网综合风险为:

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{R}' \mathbf{W} \quad (10)$$

$$\mathbf{W} = k_A \mathbf{W}_A + k_S \mathbf{W}_S \quad (11)$$

其中, $\mathbf{W}$ 为各个风险指标的主客观组合权重; $\mathbf{W}_A$ 为主观权重,利用层次分析法^[18]获得; $\mathbf{W}_S$ 为客观权重,利用熵值法^[19]获得; k_A 、 k_S 分别为线性加权的主客观偏好系数。本文均衡考虑主客观权重,即主客观偏好系数均为 0.5。

4 算例分析

4.1 算例简介

本文以某省级电网 2013 年夏季最大运行方式为例,选取关键 500 kV 输电线路进行风险评估。首先,根据过去 10 年该地区关键 500 kV 输电线路的平均故障概率及健康指数,利用云预测模型计算输电线路的故障概率,然后分别计算系统运行的风险指标,得到电网综合风险指标。详细流程如图 1 所示。

4.2 输电线路故障概率计算

以廉北 I 线为例预测其故障概率。廉北 I 线近十年输电线路的状态评价健康指数及故障概率平均值如表 2 所示。

通过一维逆向云发生器建立输电线路的故障概率正态云预测模型,得到云预测模型的期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 值分别为 0.168 1、0.079 7 和 0.005 9,因为 $E_n/H_e=13.51>10$,故 E_x 的绝对误差小于 1%, E_n 的相对误差小于 2%, H_e 的相对误差小于 10%,满足

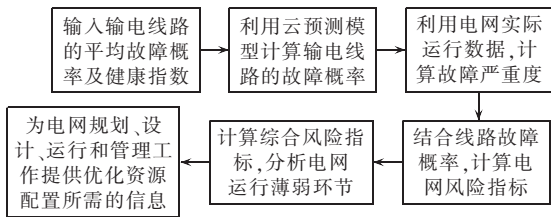


图 1 考虑输电线路故障特性的电网
综合风险评估流程图

Fig.1 Flowchart of comprehensive power grid
risk assessment considering transmission
line failure characteristics

表 2 廉北 I 线状态数据

Tab.2 State data of Lianbei line I

年份	健康指数	故障概率	年份	健康指数	故障概率
2002	10	0.104	2008	23	0.238
2003	14	0.163	2009	10	0.213
2004	12	0.184	2010	18	0.308
2005	11	0.108	2011	10	0.089
2007	13	0.150	2012	12	0.106

精度要求。在此基础上,利用生成的正态云模型产生一定数量的云滴均值得到廉北 I 线 2013 年每 100 km 的故障概率预测值 0.168 1 次/a。图 2 给出了基于正态云模型的廉北 I 线故障概率抽样分布情况。

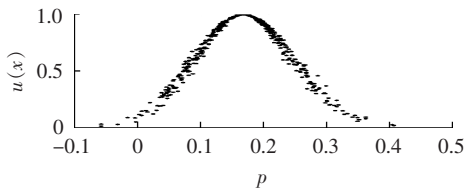


图 2 基于云模型的廉北 I 线故障概率预测分布图

Fig.2 Lianbei line I failure probability distribution
predicted based on cloud model

按照上述方法,计算出该地区关键 500 kV 输电线路 2013 年每 100 km 的故障概率预测值,再乘以输电线路的长度获得各线路的故障概率预测值,如表 3 所示。

表 3 主要输电线路故障概率预测结果

Tab.3 Predicted failure probability of major
transmission lines

线路名称	每 100 km 的故障概率 预测值/(次·a ⁻¹)	实际 长度/km	故障概率预测 值/(次·a ⁻¹)
廉北 I 线	0.168 1	45.626	0.076 7
廉集线	0.129 4	55.338	0.071 6
彭廉 I 线	0.150 2	67.431	0.101 3
彭广 I 线	0.118 9	51.854	0.061 7
广蔺线	0.118 8	74.745	0.088 8
广辛线	0.139 4	76.643	0.106 8
北清 I 线	0.134 5	105.281	0.141 6
清保 I 线	0.147 6	45.103	0.066 6
清沧线	0.141 1	118.796	0.167 6
沧骅 I 线	0.136 4	68.920	0.094 0

4.3 电网运行风险综合评估

计算电网各风险子指标,结果如表 4 所示。

表 4 输电线路各风险子指标值

Tab.4 Values of different transmission line risk indexes

线路名称	指标值			
	负荷损失	潜在连锁故障	电压越限	稳定指数
廉北 I 线	1.433 6	0.072 3	0.048 6	2.744 8
廉集线	15.478 8	0.015 1	0.031 4	1.721 6
彭廉 I 线	8.016 8	0.079 9	0.030 6	1.337 4
彭广 I 线	0.809 9	0.006 4	0.014 8	0.629 4
广蔺线	5.630 4	0.009 9	0.011 5	0.709 7
广辛线	5.881 3	0.014 6	0.014 1	1.007 4
北清 I 线	2.606 1	0.013 4	0.017 8	0.828 8
清保 I 线	2.198 5	0.006 6	0.006 3	0.430 0
清沧线	3.637 1	0.077 9	0.027 2	0.717 6
沧骅 I 线	2.285 7	0.010 9	0.013 7	0.569 2

运用层次分析法和熵值法计算出指标间的主客观权重,其中在主观权重中本文认为 4 个指标同等重要。主客观权重计算结果如表 5 所示。

表 5 电网风险评估的指标权重

Tab.5 Weight of power grid risk
assessment index

风险指标	客观权重	主观权重	组合权重
负荷损失	0.295 3	0.25	0.272 6
潜在连锁故障	0.412 5	0.25	0.331 2
电压越限	0.137 5	0.25	0.193 8
稳定指数	0.154 7	0.25	0.202 4

基于以上的风险指标和组合权重,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。

表 6 输电线路综合风险指标值

Tab.6 Values of comprehensive transmission
line risk index

线路名称	故障概率/(次·a ⁻¹)	电网风险综合指标值
廉北 I 线	0.076 7	0.979 8
廉集线	0.071 6	4.580 6
彭廉 I 线	0.101 3	2.489 3
彭广 I 线	0.061 7	0.353 2
广蔺线	0.088 8	1.684 6
广辛线	0.106 8	1.815 3
北清 I 线	0.141 6	0.886 3
清保 I 线	0.066 6	0.690 0
清沧线	0.167 6	1.168 2
沧骅 I 线	0.094 0	0.744 8

从上述计算结果可以看到,尽管清沧线故障概率明显高于廉集线,但故障严重程度却低于廉集线,最终廉集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,这也说明了效用函数理论在用于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 2 种风险,为运行人员提供较好的指导依据。

5 结论

考虑输电线路故障特性进行电网综合风险评

估,找出电网运行薄弱环节,这对电力系统安全运行和降低运行维护成本具有重要意义。本文构建了考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系,针对输电线路故障的不确定性,建立了基于云模型的输电线路故障概率预测模型,该模型能够有效地实现从输电线路健康状态定性评价到其故障概率定量计算的转化;同时,利用效用理论建立了一套包含广义负荷损失、潜在连锁故障、电压越限和系统稳定指数等风险指标的电网风险评估指标体系,并采用层次分析法和熵值法确定指标的主、客观权重,结合模糊综合评价法对电网进行综合风险评估,从而找出电网运行薄弱环节。实际电网算例表明,考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系能够有效预测输电线路故障概率,区分高损失、低概率与低损失、高概率这2种风险,为运行人员提供指导依据,具有实用性和有效性。

参考文献:

- [1] 陈为化,江全元,曹一家,等. 基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):20-25.
CHEN Weihua,JIANG Quanyuan,CAO Yijia,et al. Voltage vulnerability assessment based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(24):20-25.
- [2] 陈为化,江全元,曹一家,等. 电力系统电压崩溃的风险评估[J]. 电网技术,2005,29(19):6-11.
CHEN Weihua,JIANG Quanyuan,CAO Yijia,et al. Risk assessment of voltage collapse in power system[J]. Power System Technology, 2005,29(19):6-11.
- [3] 李蓉蓉,张晔,江全元,等. 复杂电力系统连锁故障的风险评估[J]. 电网技术,2006,30(10):18-23.
LI Rongrong,ZHANG Hua,JIANG Quanyuan,et al. Risk assessment for cascading failures of complex power system[J]. Power System Technology,2006,30(10):18-23.
- [4] 冯永青,张伯明,吴文传,等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估(一)运行风险的提出与发展[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):17-23.
FENG Yongqing,ZHANG Boming,WU Wenchuan,et al. Power system operation risk assessment based on credibility theory part one propound and development of operation risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(1):17-23.
- [5] 冯永青,吴文传,张伯明,等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估(二)理论基础[J]. 电力系统自动化,2006,30(2):11-15,21.
FENG Yongqing,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. Power system operation risk assessment based on credibility theory part two theory fundament[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(2):11-15,21.
- [6] 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.
- [7] 王慧芳,杨荷娟,何奔腾,等. 输变电设备状态故障率模型改进分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):27-31,43.
WANG Huifang,YANG Hejuan,HE Benteng,et al. Improvement of state failure rate model for power transmission and transforming equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(16):27-31,43.
- [8] 余绍峰,何文林,孙翔,等. 输变电设备故障率的估算方法[J]. 浙江电力,2009,28(6):5-8.
YU Shaofeng,HE Wenlin,SUN Xiang,et al. A estimation method of power transmission equipment failure rate[J]. Zhejiang Electric Power,2009,28(6):5-8.
- [9] 白恺,罗日成. 输变电设备风险评估[J]. 中国电力,2009,42(10):48-51.
BAI Kai,LUO Richeng. Study on risk assessment of transmission and distribution equipments[J]. Electric Power,2009, 42(10):48-51.
- [10] 刘杨. 输电系统连锁故障风险评估[D]. 上海:上海交通大学,2011.
LIU Yang. Risk assessment of transmission system cascading failure[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2011.
- [11] 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.
- [12] 邵帅,梁少卫. 云模型在水资源供求预测中的应用[J]. 西北民族大学学报:自然科学版,2008,29(3):79-82,94.
SHAO Shuai,LIANG Shaowei. Applications of cloud model in predicting water resource supply and demand[J]. Journal of Northwest University for Nationalities:Natural Science,2008,29 (3):79-82,94.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] ALI M H,MURATA T,TAMURA J. 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.
- [17] 尹洪,刘天琪,江东林,等. 基于改进层次分析法的大面积停电事故抢修后模糊综合评价[J]. 华东电力,2012,40(8):1341-1345.
YIN Hong,LIU Tianqi,JIANG Donglin,et al. Fuzzy comprehensive evaluation of large-scale blackout emergency repair based on improved AHP [J]. East China Electric Power,2012,40 (8): 1341-1345.
- [18] 刘从法,罗日成,雷春燕,等. 基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):104-107,133.
LIU Congfa,LUO Richeng,LEI Chunyan,et al. Power trans-

former condition assessment based on AHP grey fixed weight clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):104-107, 133.

- [19] 周念成, 池源, 王强钢, 等. 并网光伏电站在线监测与状态评估系统[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10):6-11.

ZHOU Niancheng, CHI Yuan, WANG Qianggang, et al. On line monitoring and state evaluation system for grid connected PV generation station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10):6-11.

作者简介:



巫伟南

巫伟南(1989-), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制
(E-mail:vigor_wu@whu.edu.cn);

杨 军(1977-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制
(E-mail:JYang@whu.edu.cn)。

Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure

WU Weinan¹, YANG Jun¹, HU Wenping², ZENG Zhili¹, YU Teng kai², LIU Pei¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The random and fuzzy transmission line failure impacts severely on the operational safety of power grid, for which, a comprehensive risk assessment system with the consideration of its characteristics is proposed. A transmission line failure probability prediction model is built based on the cloud model, which generates the normally distributed clouds according to the data of transmission line state assessment to predict its failure probability. Based on utility theory, a comprehensive risk assessment index system is built for power grid, which includes the general load loss, potential cascading failure, voltage limit violation and system stability, which is used to scan the operational weakness of power grid. With a real power grid as a study case, the effectiveness and practicality of the proposed assessment system are verified.

Key words: electric power systems; electric power transmission; forecasting; cloud prediction model; utility theory; risk assessment; analytic hierarchy process; entropy method; failure analysis

(上接第 128 页 continued from page 128)

Power control method for autonomous microgrid

WANG Xubin, LI Peng, DOU Pengchong, ZHOU Zeyuan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Traditional droop control can hardly realize the accurate power assignment in microgrid because of some influencing factors, such as the characteristics of line impedance, for which, a strategy of active power-frequency($P'-f$) and reactive power-voltage differential($Q'-dU/dt$) power control is proposed. The voltage compensation control method based on voltage amplitude variation rate(dU/dt) is applied to realize the accurate reactive power assignment while the system voltage is maintained stable in a certain level and the dynamic performance is insured. The small signal model analysis shows that, the instantaneous system response is greatly affected by the coefficients of control equation and the rational parameter design improves the dynamic performance of system. Different system states of autonomous microgrid are simulated and analyzed, which verifies the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: microgrid; $Q'-dU/dt$ control; voltage control; compensation; power control; droop control