

基于熵权法的新能源高渗透率送端电网 风险模糊综合评价

郝如海¹, 智勇¹, 祁莹¹, 拜润卿¹, 刘文飞¹,
龚庆武², 方金涛², 刘栋², 陈文辉²

(1. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 新能源高渗透率送端电网在中国分布广泛, 同时存在难以忽略的风险, 但是目前没有针对新能源高渗透率送端电网风险评估的模型和指标体系, 传统风险评估方法也难以对其进行定量风险评估。构建较为完整的新能源高渗透率送端电网风险评价指标体系, 提出基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价方法, 利用熵权法确定各指标权重, 采用改进三角梯形隶属函数确定隶属度, 通过模糊综合评价得到综合评价结果。针对某新能源高渗透率送端电网实例进行分析, 分析结果表明提出的方法可有效评估新能源高渗透率送端电网风险程度, 为电网实际运行提供依据和参考。

关键词: 新能源高渗透率; 送端电网; 熵权法; 风险评估; 模糊综合分析

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.008 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2021)01-0073-06

Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable energy penetration power grid at sending end

HAO Ruhai¹, ZHI Yong¹, QI Ying¹, BAI Runqing¹, LIU Wenfei¹,
GONG Qingwu², FANG Jintao², LIU Dong², CHEN Wenhui

(1. Gansu Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Power Co., Ltd., Lanzhou 730000, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The high renewable energy penetration power grid at sending end is widely distributed in China and their safety risks are existed and can not be ignored. Currently, there is no specific model and indicator system for its risk assessment while the traditional risk assessment method is also difficult to conduct a quantitative risk assessment. Under the background, a relatively complete evaluation index system is constructed for the high renewable energy penetration power grid at sending end, and a fuzzy comprehensive evaluation method is proposed based on the entropy weight method. The entropy weight method is utilized to determine the weight of each index. The degree of membership is determined by the improved triangular trapezoidal membership function and the comprehensive evaluation re-

收稿日期:2018-09-13;修回日期:2019-06-13

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0904200)

通信作者:龚庆武(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统仿真分析研究;E-mail:qwong@whu.edu.cn

sults are obtained through fuzzy comprehensive evaluation. This paper analyzes an example of the high renewable energy penetration power grid at sending end. The analysis results show that the proposed method can effectively evaluate the risk degree of the power grid at sending end and provide a basis and reference for the actual operation of the power grid.

Key words: the high renewable energy penetration; power grid at sending end; entropy method; risk assessment; fuzzy synthetic evaluation

新能源高渗透率送端电网对调控运行管理要求较高,不仅要尽量提高新能源的消纳和外送^[1],同时还需调整运行方式以适应受端电网的变化,实现互联电网的安全稳定运行^[2]。但是新能源高渗透率送端电网在满足能源结构调整需求的同时还存在以下问题:①由于风能、太阳能等新能源渗透率比较高,波动大,导致弃风弃光现象严重,新能源电力和电量无法匹配^[3];②清洁能源的调度控制存在一定难度;③外送功率占比高;④由于传统送端电网结构复杂、输电距离长,无法满足上述要求^[4];⑤火电机组调峰困难。这些问题的出现都增加了新能源高渗透率送端电网整体的风险水平。

传统电网风险评估的方法包括解析法和模拟法等,这些方法已较为成熟,但是没有针对新能源高渗透率送端电网风险评估的模型和指标体系,传统风险评估方法难以对其进行定量风险评估,这从某种程度上制约了新能源高渗透率送端电网的发展。文献[5]通过构建大区互联送端电网评估指标体系,对其进行动态风险评估,但是没有考虑新能源高渗透率的问题;文献[6]运用了层次分析法和模糊评价法分析智能电网风险状况,但是由层次分析法确定的权重是建立在专家咨询的基础上的,这种方法的弊端是主观性较强,导致评价结果差异性较大。

该文首先针对新能源高渗透率送端电网存在安全风险因素多,难以进行定量评估的特点,构建较为完整的新能源高渗透率送端电网评价指标体系,既考虑电网安全风险因素,又考虑送端电网弃风光风险因素;然后提出基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价方法,利用熵权法确定各指标权重,采用改进三角梯形隶属函数确定隶属度,

通过模糊综合评价得到综合评价结果;最后针对某新能源高渗透率送端电网实例进行分析,分析结果表明该文提出的方法可有效评估新能源高渗透率送端电网风险程度,为电网实际运行提供依据和参考。

1 熵值法与模糊综合评价

1.1 模糊综合评价

风险评估涉及许多指标因素,且难以量化处理。利用模糊语言给出不同程度的评价值,将评价值进行综合,即将模糊理论应用到层次分析法中,集模糊数学、层次架构、权重比较于一体进行分析,这称为模糊综合评价法^[7-8]。

将被评价的对象按照某种属性划分为 n 个指标的论域 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$, 每个指标因素对应一个评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$, 这种对应关系是由模糊映射(可以是某种隶属函数)得到的,具体映射过程表示为 $R = U \times V$ 的模糊矩阵。其次为 n 个评价指标分配权重,得到权重向量 $A = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n]$;经模糊运算 $B = A \circ R$, 得模糊子集 $B = [b_1, b_2, b_3, \dots, b_m]$, 其中模糊子集 B 表示评价对象对评语的隶属程度。

1.2 熵值法

“熵”是热力学的一个概念,是由法国物理学家 K. Clausius 在 1854 年提出的。熵值的大小代表着系统紊乱度的大小,用来描述系统的不确定性。它先被用在热力学中,之后在信息论中得到广泛应用^[9-10]。

熵值法是根据各指标紊乱程度确定指标权重,指标的紊乱程度越大,其对综合评价的影响越大,权重越大,这种客观赋权法能够有效避免人为因素造成的偏差。评价因素的权重集 A_i , 可由熵值法求

出,其本质是由评价因素的价值系数决定的,价值系数的高低决定权重的大小^[11]。

2 综合评价中权重系数的确定

1) 构建评价矩阵。

$$U' = \begin{bmatrix} u'_{11} & u'_{12} & \cdots & u'_{1j} \\ u'_{21} & u'_{22} & \cdots & u'_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u'_{i1} & u'_{i2} & \cdots & u'_{ij} \end{bmatrix}_{i \times j} \quad (1)$$

式中 u_{ij} 为第 i 个状态量中第 j 个因素数值。

2) 评价矩阵标准化处理。

新能源高渗透率送端电网评价因素的状态数据难以准确度量,而且有些因素不在同一量级,因此需要对评价数据进行标准化处理。

对于正向指标:

$$u_{ij} = \frac{u'_{ij} - \min\{u'_j\}}{\max\{u'_j\} - \min\{u'_j\}} \quad (2)$$

对于负向指标:

$$u_{ij} = \frac{\max\{u'_j\} - u'_{ij}}{\max\{u'_j\} - \min\{u'_j\}} \quad (3)$$

式中 u_{ij} 为标准化后的数据。

3) 计算第 j 综合状态下第 i 因素占该指标的比重。

$$X_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{i=1}^n u_{ij}} \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

4) 计算第 j 项指标的信息熵及熵冗余度。

信息熵:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m X_{ij} \times \ln X_{ij} \quad (5)$$

其中 $k=1/\ln(m)$ 。

熵冗余度:

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

5) 因素权重系数。

$$\omega_i = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (7)$$

3 新能源高渗透率送端电网安全风险评估步骤

3.1 新能源高渗透率送端电网风险评估体系

由于中国东西部地区经济发展水平的差异以及能源与用电需求不均的客观要求,西电东送成为发展的战略要求。目前西北省份的新能源发电总量已经占到发电总量的 40% 以上^[12],作为送端电网,其新能源渗透率很高,但是又存在严重的弃风弃光、结构薄弱、抗灾能力弱、科技含量低等问题,系统面临着安全风险问题。

1) 电网的安全风险。

电网的安全风险来源于自身的缺陷和脆弱性,安全风险类型包括负荷波动、电网结构薄弱、继电保护失效、人为因素造成的风险等风险。

2) 高渗透率送端电网的弃风光风险。

由于目前技术发展的缺陷,新能源并网造成的问题对电网安全是一个较为重要的因素,尤其在新能源渗透率高达 40% 的西北地区。由于火电机组调峰困难,环境变化多端,风能、太阳能等新能源波动大,备用容量不足,新能源技术缺陷等因素导致弃风弃光现象严重,新能源电力和电量无法匹配,高电力低电量共存造成电力平衡困难。

考虑到电网安全风险因素和新能源并网带来的弃风光风险,结合送端电网的特征,建立了新能源高渗透率送端电网评估指标体系,具体指标体系见表 1。评估指标体系将新能源高渗透率送端电网安全风险评估分为 3 级指标体系,综合考虑了送端电网的安全风险因素和弃风光风险因素,并建立了其结构风险、运行风险、技术风险等 2 级指标及其子指标,并以其为基准进行再细分为多个 3 级指标^[13-15]。

3.2 建立模糊综合评价模型的因素集和评判集

根据表 1 所示,新能源高渗透率送端电网评估结果 U 由电网的安全风险 U_1 和高渗透率送端电网弃风光风险 U_2 模糊运算结果确定。其中 U_1 和 U_2 又可以分为结构风险、运行风险、技术风险 3 个方面进行评估。

根据新能源高渗透率送端电网的特点,可将新能源高渗透率送端电网风险评估等级论域分为5个等级,记为

$$V = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4 \quad v_5] \quad (8)$$

其中, v_1 为高风险; v_2 为较高风险; v_3 为中等风险; v_4 较低风险; v_5 低风险。

表1 新能源高渗透率送端电网风险评估指标体系

Table 1 Risk assessment indicator system of power grid at sending end

1级指标	2级指标	3级指标
电 网 安 全 风 险 U_1	结构风险 U_{11}	传统电源结构 U_{111}
		电网拓扑结构 U_{112}
		外送功率比 U_{113}
	运行风险 U_{12}	调度运行 U_{121}
		方式计划 U_{122}
		人为操作 U_{123}
	技术风险 U_{13}	管理技术 U_{131}
		输变电设备可靠性 U_{132}
		安全稳定控制技术 U_{133}
		新能源接入点 U_{211}
结构风险 U_{21}	新能源渗透率 U_{212}	
	储能装置补偿能力 U_{213}	
	并网网切换风险 U_{221}	
运行风险 U_{22}	新能源调度管理 U_{222}	
	环境变化 U_{223}	
	新能源实时控制技术 U_{231}	
技术风险 U_{23}	新能源发电预测 U_{232}	
	新能源设备可靠性 U_{233}	
弃 风 弃 光 风 险 U_2	结构风险 U_{21}	新能源接入点 U_{211}
		新能源渗透率 U_{212}
		储能装置补偿能力 U_{213}
	运行风险 U_{22}	并网网切换风险 U_{221}
		新能源调度管理 U_{222}
		环境变化 U_{223}
	技术风险 U_{23}	新能源实时控制技术 U_{231}
		新能源发电预测 U_{232}
		新能源设备可靠性 U_{233}

3.3 确定隶属函数

模糊评价的基础是如何确定隶属度函数,常见的隶属度函数有三角形分布、正态分布、梯形分布,并由专家经验法、例证法、模糊统计法确定隶属度函数^[16-17]。

为了提高送端系统状态评价的合理性、准确性,考虑到梯形分布和三角形分布各自的特点,该文打算将三角形和梯形相结合,采用改进的三角梯形分布确定隶属度,得到合理的分布状态。

具体表达式为

$$r(v_1) = \begin{cases} 1, & v \leq 0.2 \\ \frac{v-0.4}{0.4-0.2}, & 0.2 \leq v \leq 0.4 \\ 0, & 0.4 \leq v \end{cases} \quad (9)$$

$$r(v_i) = \begin{cases} 1, & v_{i-1} \leq v \leq v_i \\ \frac{v-v_{i-1}}{v_i-v_{i-1}}, & v_i \leq v \leq v_{i+1} \\ \frac{v-v_{i+1}}{(-1)^i(v_{i+1}-v_i)}, & v_i \leq v \leq v_{i+1} \\ 0, & v \geq v_{i+1} \end{cases} \quad (10)$$

$$r(v_5) = \begin{cases} 0, & v \leq 0.8 \\ \frac{v-0.8}{1-0.8}, & 0.8 \leq v \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 1, & 1 \leq v \end{cases}$$

由模糊关系矩阵得单因素评价矩阵:

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.4 求取综合评价模糊子集

综合评价集 B_i 为 V 上的模糊子集

$$B_i = \mathbf{A} \circ \mathbf{R}_i = [b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}, b_{i5}] \quad (13)$$

式中 \mathbf{A} 为综合权重集; \mathbf{R}_i 为第 i 个方案的模糊评价矩阵;算子 \circ 采用 $M(\cdot, +)$ 模型,则有

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^n a_j r_{ik}, 1 < k < m \quad (14)$$

然后,由式(14)确定高层因素综合评价矩阵:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} [B_1] & [A_1 \circ R_1] \\ B_2 & A_2 \circ R_2 \\ \vdots & \vdots \\ [B_l] & [A_l \circ R_l] \end{bmatrix} \quad (15)$$

4 算例分析

该文根据西北新能源渗透率最高的 G 省份进行安全风险评估,该省份风光资源充足,新能源发电占比高达 45%,存在严重的弃风弃光现象,新能源并网潜在风险较大。所以该文打算采用模糊综合层次分析法对其进行分析,依次衡量系统目前的安全风险水平。

4.1 评价因素的模糊关系矩阵

根据专家评价法得到的评价状态,如表 2 所示,使用式(9)~(11)计算各评价因素的隶属度,得到新能源高渗透率送端电网运行状况的模糊关系矩阵。

表 2 送端电网风险综合评价结构

Table 2 Structure of the comprehensive evaluation of the transmission grid risk

评价因素			隶属度				
一级	二级	三级	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
U_1	U_{11}	U_{111}	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2
		U_{112}	0	0.2	0.3	0.3	0.2
		U_{113}	0.5	0.3	0.1	0.1	0
	U_{12}	U_{121}	0	0	0.2	0.5	0.3
		U_{122}	0	0.2	0.3	0.3	0.2
		U_{123}	0	0	0.2	0.3	0.5
	U_{13}	U_{131}	0	0.2	0.5	0.2	0.1
		U_{132}	0	0.2	0.4	0.2	0.2
		U_{133}	0	0	0.1	0.2	0.7
	U_{21}	U_{211}	0.7	0.2	0.1	0	0
		U_{212}	0.5	0.4	0.1	0	0
		U_{213}	0.3	0.5	0.2	0	0
	U_2	U_{22}	U_{221}	0.2	0.3	0.3	0.2
U_{222}			0.3	0.4	0.3	0	0
U_{223}			0.7	0.1	0.2	0	0
U_{23}		U_{231}	0.8	0.1	0.1	0	0
		U_{232}	0.5	0.3	0.1	0.1	0
		U_{233}	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1

4.2 权重计算

由式(7)可得因素常权重系数

$$A=[A_1 \ A_2]\%$$

$$A_1=[0.266 \ 9 \ 0.076 \ 0 \ 0.246 \ 5 \ 0.266 \ 9 \ 0.373 \ 0 \ 0.360 \ 1 \ 0.308 \ 6 \ 0.435 \ 6 \ 0.256 \ 3]$$

$$A_2=[0.213 \ 1 \ 0.429 \ 6 \ 0.357 \ 4 \ 0.225 \ 6 \ 0.320 \ 9 \ 0.453 \ 5 \ 0.398 \ 5 \ 0.333 \ 0 \ 0.268 \ 4]$$

4.3 模糊综合评价

使用式(13)可得模糊评价子集分别为

$$B_1=A_1 \circ R_1=$$

$$[0.035 \ 5 \ 0.115 \ 6 \ 0.250 \ 5 \ 0.242 \ 1 \ 0.259 \ 1]$$

$$B_2=A_2 \circ R_2=$$

$$[0.482 \ 3 \ 0.288 \ 5 \ 0.189 \ 5 \ 0.033 \ 2 \ 0.006 \ 4]$$

考虑到传统电网风险和弃风光风险具有同等重要性,应用式(15)得到综合风险模糊评估矩阵:

$$B=[0.258 \ 9 \ 0.202 \ 0 \ 0.220 \ 0 \ 0.137 \ 6 \ 0.132 \ 8]$$

根据隶属度最大化原则,从评价结果可以看出,隶属度最大的是‘高风险’状态,但与‘中等风险’的隶属度相差不大,若用最大隶属度原则判断送端电网总体处于‘高风险’状态有些勉强,不能准确显示

状态信息,此时可用模糊分布法来判断整体运行状态。从整体性能的隶属度看,“高风险”与“中等风险”的隶属度分别为 25.89%和 22%,而“较低风险”与“低等风险”的隶属度分别只有 13.76%和 13.28%,由此推断,送端电网安全风险的状态大致处于“高风险”与“中等风险”之间。

根据综合得分法,设评价集量化后的分数向量为

$$S^T=[50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90]$$

则综合得分为

$$f=B \cdot S=63.427 \ 5$$

该评估结果处于较高风险这一范畴,这与综合风险评估的结果相一致,说明送端电网的安全风险为较高水平,此新能源高渗透率送端电网的安全等级还有很大的提升空间。

5 结语

1)该文针对新能源高渗透率送端电网的特点,建立了新能源高渗透率送端电网安全风险评估体系,提出的电网安全风险和新能源并网带来的弃风弃光风险相结合的指标体系对送端电网的实际运行状况的判断有很大的帮助。

2)使用熵值法能有效地将专家的主观偏好和数据的客观性结合起来,避免了人为因素带来的偏差,从而给出了更为合理的指标权重。

3)结合送端电网和三角梯形分布的特点,该文采用改进的三角梯形分布确定隶属度,得到更好的合理分布状态,构建模糊评价矩阵,使得评价结果更加合理、准确。

参考文献:

[1] 杨清润,丁涛,文亚,等.计及碳排约束的跨国电力互联网新能源消纳分析[J].智慧电力,2019,47(10):1-6+30.
YANG Qingrun,DING Tao,WEN Ya,et al. Analysis on renewable energy integration intransnational power interconnection considering carbon emission constraints [J]. Smart Power,2019,47(10):1-6+30.

[2] 陈赞,陈得治,马世英.风光火打捆交直流外送系统的高频切机方案研究[J].电网技术,2016,40(1):186-192.
CHEN Yun,CHEN Dezhi,MA Shiyong. Studies on high-frequency generator tripping strategy for wind-photovoltaic-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power Grid Technology,2016,40(1):186-192.

[3] 晋宏杨,王维洲,梁琛.考虑高载能负荷无功特性的高载能-

- 新能源协调调度[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2618-2624.
- JIN Hongyang, WANG Weizhou, LIANG Chen. Dispatch strategy for energy intensive enterprise and renewable generation considering reactive power characteristics of devices[J]. Power Grid Technology, 2017, 41(8): 2168-2624.
- [4] 刘振亚, 张启平, 王雅婷. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1015-1022.
- LIU Zhenya, ZHANG Qiping, WANG Yating. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in northwest China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015-1022.
- [5] 赵珊珊, 周子冠, 张东霞. 大区互联电网动态稳定风险评估指标及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 68-72.
- ZHAO Shanshan, ZHOU Zhiguan, ZHANG Dongxia. Risk assessment index of dynamic stability for large-scale interconnected grids and its application[J]. Power Grid Technology, 2009, 33(2): 68-72.
- [6] 曾鸣, 陈英杰, 胡献忠, 等. 基于多层次模糊综合评价法的我国智能电网风险评价[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 535-539.
- ZENG Ming, CHEN Yingjie, HU Xianzong. The risk assessment of China's smart grid based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation method[J]. East China Electric Power, 2011, 39(4): 535-539.
- [7] 姚薇薇, 李华强, 贺强, 等. 电网连锁性故障序列的模糊综合评价方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(4): 79-85.
- YAO Weiwei, LI Huaqiang, HE Qiang, et al. Fuzzy synthetic evaluation method of cascading failure sequence in power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(4): 79-85.
- [8] 周勇, 李秀娟, 余华兴, 等. 基于变权系数的 GIS 运行状态多层模糊综合评判[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 69-75.
- ZHOU Yong, LI Xiujian, YU Huaxing, et al. Multi level fuzzy comprehensive evaluation of GIS running state based on variable weight coefficient[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 69-75.
- [9] 林济铿, 李童飞, 赵子明. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动方案评估[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 115-120.
- LIN Jikeng, LI Tongfei, ZHAO Ziming. Assessment on power system black-start schemes based on entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Power Grid Technology, 2012, 36(2): 115-120.
- [10] 向思阳, 蔡泽祥, 刘平, 等. 基于 AHP-反熵权法的配电网低碳运行模糊综合评价[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 69-76.
- XIANG Siyang, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the low-carbon operation of distribution network based on AHP-Anti-Entropy method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 69-76.
- [11] 宋人杰, 陈禹名. 基于变权系数的继电保护状态模糊综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 46-50.
- SONG Renjie, CHEN Yuming. Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 46-50.
- [12] 王敏骁, 苏娟, 梁琛. 西北大规模新能源消纳问题成因分析及综合应对策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(10): 124-128.
- WANG Minyao, SU Juan, LIANG Chen. Research on cause analysis and coping strategies on consumption of large scale renewable in northwest China[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(10): 124-128.
- [13] 武卫东, 何金栋, 沈文, 等. 集成防危性与安全性的电力 CPS 风险分析 研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20): 51-59.
- WU Weidong, HE Jindong, SHEN Wen, et al. A survey on integrated safety and security risk analysis of power cyber-physical system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20): 51-59.
- [14] Pei C, Zhang Z, Yin X G. Index system and methods for urban power grid operation risk assessment [C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xian, China: IEEE, 2016.
- [15] Fang Y J. Reflections on stability technology for reducing risk of system collapse due to cascading outages[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2014, 2(3): 264-271.
- [16] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-7.
- WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7.
- [17] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52.
- WU Jiang, CAI Zexiang, HU Chunchao. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 48-52.