

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.022

应用云重心评判理论的并网风电机组性能分析

张心刚¹, 苏浩益²

(1. 吉林铁道职业技术学院, 吉林 吉林 132200; 2. 湘潭供电公司, 湖南 湘潭 411104)

摘要: 针对并网风力发电机组性能分析评估中存在大量定性指标、各指标模糊性和随机性并存的问题, 提出了基于云重心评判法的并网风电机组性能分析评估模型。首先从技术参数、整体功能、系统可靠性及机组维修性4个层面分析并构建了风电机组性能分析综合评价指标体系。然后将各指标值转化为云模型并确定各个指标的权重值。最后计算出修正的加权偏离度, 将其输入定性评判云发生器得到风电机组性能评估结果。运用所提方法对某型风力发电机组性能进行分析, 并与模糊综合评判法进行比较, 验证了该模型的优越性和有效性。

关键词: 性能分析; 风电机组; 云理论; 云重心评判法; 加权偏离度

Performance Analysis of a Grid-connected Wind Turbine Generator System Based on Membership Cloud Gravity Center

ZHANG Xingang¹, SU Haoyi²

(1. Jilin Railway Vocational and Technical College, Jilin Jilin 132200, China;
2. Xiangtan Power Supply Bureau, Hunan Xiangtan 411104, China)

Abstract: Considering the fact that there are many qualitative indexes in performance analysis and evaluation of a grid-connected wind power generation system and each index is random and fuzzy, a performance analysis model of grid-connected wind turbine generator system is established based on membership cloud gravity center. The comprehensive evaluation index system of performance analysis for a grid-connected wind power generation system is analyzed and constructed with respect to four aspects, i.e. technical parameters, overall function, system reliability, and maintainability. Then, the values of the evaluation indexes are transformed to cloud model, and the weight of each index is determined. Finally, the modified weighted deviation degree is calculated and put into the qualitative judgement cloud generator to obtain performance evaluation result of the wind power generation system. The proposed method is employed to analyzed the performance conditions of a certain wind power generation unit, and is compared with the conventional fuzzy comprehensive evaluation method to verify the superiority and effectiveness of the proposed model.

Key words: performance analysis; wind power generation system; cloud theory; membership cloud gravity center; weighted deviation degree

0 引言

能源与环境的双重压力促使中国风电装机容量迅速增长, 风力发电的低污染、可再生性、规模效益显著等优点决定了其光明的发展前景。风电机组的运行环境复杂, 维护成本较高, 以风电机组的综

合性能指标为基础, 客观准确分析机组性能对优化风电机组设备选型、实现风电机组安全稳定运行、降低维护成本、提高机组运行效率具有重要意义。

大规模风电机组并网运行引起了广大学者的关注^[1-8]。由于风电机组各部件具有动态性、相关性和随机性特征^[9], 加之缺乏大规模风电机组并网运行经验和可靠性实验数据, 使得目前对风电机组性能分析的研究工作一般仅局限于某一方面, 而不能

够全面反映机组综合性能。文[10]从机组技术指标、系统功能、系统可靠性、系统维护性等4个层面出发,建立了风力发电机组性能分析模糊综合评判模型,取得了较好的效果,但是在构建评价指标的模糊隶属度函数时存在较大的主观性。一般的风力发电机组性能分析综合评价指标体系中兼具定性定量成分,如何同时定量处理各指标的随机性和模糊性,是当前迫切需要解决的实际问题。

云理论把理事物的随机性和模糊性有效的集成,在电力系统中得到了较好的应用^[11]。文中通过构建并网风力发电机组性能分析综合评价指标体系,提出了一种基于改进的云重心评判法的并网风电机组性能分析模型。运用文中所提的方法对某型并网风电机组进行计算,并与模糊综合评判法的结果进行了对比和分析。

1 并网风电机组性能分析模型的建立

1.1 综合评价指标体系的建立及权重的确定

由于风电机组性能分析过程复杂,如果为了简化评判过程,单纯选取定量因素,则可能导致综合分析结果缺乏科学性和全面性;如果舍弃了影响机组性能的关键定性指标,将使得综合评判工作失去实际意义。

笔者遵循定性定量因素统筹性、系统一致性、独立性、可操作性等原则,构建风电机组性能分析综合评价指标体系,包括:技术参数指标(包括尖速比 c_1 、系统效率 c_2 、风能利用系数 c_3 、转矩系数 c_4 、轴向推力系数 c_5)、整体功能性指标(包括控制功能 c_6 、保护功能 c_7 、调节功能 c_8)、系统可靠性指标 c_9 、机组维修性指标 c_{10} 。

通过层次分析法确定各指标的主客观权重向量为 W_{s1} 。为了尽量减少人为因素的影响,由经验公式^[12](1)得到各指标的权重并经归一化处理后表示为 W_{s2} 。

$$W_{i,s2} = \begin{cases} 0.5 + \sqrt{-2\ln[\frac{2(i-1)}{n}]} / 6 & 1 < i \leq \frac{n+1}{2} \\ 0.5 - \sqrt{-2\ln[2 - \frac{2(i-1)}{n}]} / 6 & \frac{n+1}{2} < i \leq n \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: n 为指标数, i 表示排队等级, $W_{i,s2}=1$ 。

利用加法集成原理得到最终的综合权重 W 为

$$W = aW_{s1} + bW_{s2} \quad (2)$$

式(2)中: $a = \frac{1}{n+1}(\sum_{i=1}^n iP_i - \frac{n+1}{n})$,其中 P_i 表示对主

观权重向量按升序排列后求得的对应该分量; $b=1-a$ 。

利用上述方法,得到风电机组性能分析综合评价指标体系中各指标的权重信息见表1。

表1 各评估指标的权重

Table 1 The weight of each evaluation indices							
指标	W_{s1}	W_{s2}	W	指标	W_{s1}	W_{s2}	W
c_1	0.095 9	0.075 7	0.087 7	c_6	0.074 3	0.081 3	0.077 2
c_2	0.095 4	0.069 8	0.084 9	c_7	0.091 1	0.125 1	0.105 0
c_3	0.143 7	0.156 6	0.149 0	c_8	0.084 5	0.101 8	0.091 6
c_4	0.072 2	0.054 8	0.065 1	c_9	0.143 5	0.151 5	0.146 6
c_5	0.071 8	0.043 8	0.060 4	c_{10}	0.127 6	0.139 6	0.132 5

1.2 评语集的建立

文中将并网风电机组的性能状态分成优秀、良好、中等、差、很差5个级别,分别记为 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 、 v_5 。具体应用时,优秀对于效益型指标可以是很高、合理等,而对于成本型指标则可以是很低、不合理等,其余评语集类似。

2 云重心评判法

2.1 云理论

云理论^[13-14]将传统的概论统计学和模糊集理论有效融合,已成为数据挖掘和信息处理领域新的有力工具。它把定性概念的模糊性、随机性及其关联性有机统一,实现定性和定量的相互转换。云的数字特征由期望值 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 3个参数表征。其中,期望值是云的重心位置,表征了模糊概念的中心值;熵是对属性概念模糊程度的衡量;超熵反映了云的离散程度,揭示了属性概念的随机性和模糊性之间的关联性。

云重心定义为 $T=axb$,其中, a 为云重心的位置(期望值), b 为云重心的高度。期望值表征了对应模糊属性概念的信息中心值,当期望值发生变化时,它所反映的信息中心值随即改变,云重心的位置也相应的改变。一般地,云重心的高度取常值0.371^[15]。通过云重心的变化情况可以反映出系统状态信息的变化情况。

2.2 改进的云重心评判法

传统云重心评判法的加权偏离度不符合非负有界性、可加性、归一性准则,在实际应用中有一定的局限性。文中运用改进的云重心评判法^[15]进行分析,其具体步骤是:

1)将各评价指标用云模型表示。在风电机组性能分析综合评价指标体系中,既有精确数值型指标又有语言值型指标。选取 n 组样本构成评判矩阵, n 个精确数值型指标可表示为一个云模型,其中

$$E_x = (E_{x1} + E_{x2} + L + E_{xn})/n; \quad (3)$$

$$E_n = [\max(E_{x1}, L, E_{xn}) - \min(E_{x1}, L, E_{xn})]/6. \quad (4)$$

对于每个语言值型指标均有一个云模型与其对应, n 个语言值型指标可表示为一个综合云模型, 其中

$$E_x = \frac{E_{x1}E_{n1} + E_{x2}E_{n2} + \dots + E_{xn}E_{nm}}{E_{n1} + E_{n2} + \dots + E_{nm}}; \quad (5)$$

$$E_n = E_{n1} + E_{n2} + \dots + E_{nm}. \quad (6)$$

2) 用一个 p 维综合云表示具有 p 个指标的风电机组性能状态。 p 维综合云的重心向量 T 可表示为

$$T = (T_1, T_2, \dots, T_p). \quad (7)$$

式(7)中, $T_i = a_i \times b_i (i=1, 2, \dots, p)$ 。

3) 计算修正的加权偏离度衡量云重心的变化。风电机组在理想状态和负理想状态下各指标值是已知的。假设理想状态(用上标+表示)和负理想状态(用上标-表示)下, p 维综合云重心位置向量为

$$a^{(+)} = (E_{x1}^{(+)}, E_{x2}^{(+)}, \dots, E_{xp}^{(+)}). \quad (8)$$

p 维综合云重心高度向量为

$$b = (b_1, b_2, \dots, b_p). \quad (9)$$

式(9)中: $b_i = w_i \times 0.371$, 其中 w_i 为 W 对应的分量。

则理想状态和负理想状态对应的综合云重心向量为

$$T^{(+)} = (T_1^{(+)}, T_2^{(+)}, \dots, T_p^{(+)}). \quad (10)$$

式(10)中, $T_i^{(+)} = a_i^{(+)} \times b_i$ 。

将某一状态下的综合云重心向量 T 进行归一化处理, 得到向量 $T_g = (T_{g,1}, T_{g,2}, \dots, T_{g,p})$ 。

对于成本型指标为

$$T_{g,i} = (T_i - T_i^+) / (T_i^+ - T_i^-). \quad (11)$$

对于效益型指标

$$T_{g,i} = (T_i^+ - T_i) / (T_i^+ - T_i^-). \quad (12)$$

经归一化处理后, 表征风电机组性能状态的综合云重心向量为有大小和方向、无量纲的数值, 特别地, 理想状态下的综合云重心向量为零向量。通过计算修正的加权偏离度来分析某一状态与理想状态综合云重心向量的差异, 修正的加权偏离度 θ 可表示为

$$\theta = \sum_{i=1}^p w_i T_{g,i}. \quad (13)$$

理想状态的 θ 为 0, θ 值越小表示对应的状态与理想状态越接近, 反之亦然。

4) 用云模型实现评判的评语集。采用黄金分割法将优秀、良好、中等、差、很差等定性评语级分别表示成 5 类云模型^[16]。设中间云为 $C_0(E_{x0}, E_{n0}, H_{e0})$, 其左右相邻的云分别为 $C_{-1}(E_{x-1}, E_{n-1}, H_{e-1})$ 、 $C_{+1}(E_{x+1}, E_{n+1}, H_{e+1})$ 、 $C_{-2}(E_{x-2}, E_{n-2}, H_{e-2})$ 、 $C_{+2}(E_{x+2}, E_{n+2}, H_{e+2})$ 。其中

$$\begin{cases} E_{x0} = 0.5(x_{\min} + x_{\max}) \\ E_{x-2} = x_{\min} \\ E_{x+2} = x_{\max} \end{cases}; \quad (14)$$

$$\begin{cases} E_{x-1} = E_{x0} - 0.191(x_{\min} + x_{\max}) \\ E_{x+1} = E_{x0} + 0.191(x_{\min} + x_{\max}) \\ E_{n-1} = E_{n+1} = 0.0637(x_{\max} - x_{\min}) \\ E_n = 0.618E_{n+1} \end{cases}; \quad (15)$$

$$\begin{cases} E_{n-2} = E_{n+2} = E_{n+1} / 0.618 \\ H_{e-1} = H_{e+1} = H_{e0} / 0.618 \\ H_{e-2} = H_{e+2} = H_{e+1} / 0.618 \end{cases}. \quad (16)$$

有效论域为 $[0, 1]$, 给定 H_{e0} 为 0.005, 计算得出: 优秀对应的云模型为 $(1, 0.104, 0.013)$ 、良好对应的云模型为 $(0.691, 0.064, 0.008)$ 、中等对应的云模型为 $(0.5, 0.039, 0.005)$ 、差对应的云模型为 $(0.309, 0.064, 0.008)$ 、很差对应的云模型为 $(0, 0.104, 0.013)$ 。

将 5 个评语置于连续的语言标尺上, 构成定性评判云发生器, 将求得的 θ 值输入评判云发生器中, 如果激活某个评语云模型的程度大于其他评语值, 则该评语即可作为风电机组性能分析的结果。

2.3 基于边界限定原理的评估结果灵敏度分析

设 θ_s, θ_t 分别表示风电机组在工况 s, t 下的修正加权偏离度, 当机组在 s 状态下的属性值 c_{sh} 扰动 Δc_{sh} 时, 新属性值和修正加权偏离度为 $\bar{c}_{sh}, \bar{\theta}_s$ 。

$$\bar{c}_{sh} = c_{sh} + \Delta c_{sh}; \quad (17)$$

$$\bar{\theta}_s = \theta_s + \psi(\Delta c_{sh}). \quad (18)$$

式(18)中, ψ 是关于 Δc_{sh} 的函数。

令 Δc_{sth} 表示当机组在状态 s 和 t 下的排序关系变化时属性值 c_{sh} 的最小变化值, 满足式(19)

$$\Delta c_{sth} = \min\{|\Delta c_{sh}|\}. \quad (19)$$

令 $\Delta \bar{c}_{sth}$ 表示当机组在状态 s 和 t 下的排序关系变化时属性值 c_{sh} 的最小相对变化值, 满足式(20)

$$\Delta \bar{c}_{sth} = \min\{|\Delta c_{sh}|\} / c_{sh}. \quad (20)$$

令 L_s 表示机组在状态 s 下关于指标属性值的灵敏度^[17], 满足式(21)

$$L_s = 1 / \min_{1 \leq h \leq 10} \min_{1 \leq t \leq m} \{|\Delta \bar{c}_{sth}|\}. \quad (21)$$

式(21)中, $s=1 \sim m, m$ 表示机组的运行工况数。

定义最优、最劣距离 d_s^+, d_s^- 分别为

$$d_s^+ = \sum_{h=1}^{10} (\max_{1 \leq s \leq m} c_{sh, \text{bad}} - c_{sh, \text{had}}) w_h; \quad (22)$$

$$d_s^- = \sum_{h=1}^{10} (c_{sh, \text{had}} - \min_{1 \leq s \leq m} c_{sh, \text{bad}}) w_h. \quad (23)$$

式(22)、(23)中, w_h 为 W 对应的分量。

机组在状态 s 和 t 下, 当指标扰动时 $\bar{c}_{sh} = c_{sh} + \Delta c_{sh}$, $\bar{d}_s^+ = d_s^+ - \Delta c_{sh} w_h$, $\bar{d}_s^- = d_s^- + \Delta c_{sh} w_h$, 改变 θ_s 和 θ_t 排序关

系的 Δc_{sh} 满足如下充要条件。

若 $\theta_s > \theta_t$, 当 $(d_s^+ - d_t^+)/w_h \leq \Delta c_{sh} \leq 1 - c_{sh}$ 时, 排序关系改变, 即 $\bar{\theta}_s \leq \theta_t$ 。证明: 要使 $\bar{\theta}_s \leq \theta_t$ 成立 $\Leftrightarrow \bar{d}_s^+ \leq d_t^+ \Leftrightarrow d_s^+ - \Delta c_{sh} w_h \leq d_t^+ \Leftrightarrow \Delta c_{sh} \geq (d_s^+ - d_t^+)/w_h$, 又 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} \leq 1 - c_{sh}$, 综合后得证。

若 $\theta_s = \theta_t$, 当 $0 < \Delta c_{sh} \leq 1 - c_{sh}$ 时, $\bar{\theta}_s \leq \theta_t$ 或当 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} < 0$ 时, $\bar{\theta}_s > \theta_t$ 。证明: 要使 $\bar{\theta}_s < \theta_t$ 或 $\bar{\theta}_s > \theta_t$ 成立 $\Leftrightarrow \bar{d}_s^+ < d_t^+$ 或 $\bar{d}_s^+ > d_t^+ \Leftrightarrow d_s^+ - \Delta c_{sh} w_h < d_t^+$ 或 $d_s^+ - \Delta c_{sh} w_h > d_t^+ \Leftrightarrow \Delta c_{sh} > 0$ 或 $\Delta c_{sh} < 0$, 又 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} \leq 1 - c_{sh}$, 综合后得证。

若 $\theta_s < \theta_t$, 当 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} \leq (d_s^+ - d_t^+)/w_h$ 时, 排序关系改变, 即 $\bar{\theta}_s \geq \theta_t$ 。证明: 要使 $\bar{\theta}_s \geq \theta_t$ 成立 $\Leftrightarrow \bar{d}_s^+ \geq d_t^+ \Leftrightarrow d_s^+ - \Delta c_{sh} w_h > d_t^+ \Leftrightarrow \Delta c_{sh} \leq (d_s^+ - d_t^+)/w_h$, 又 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} \leq 1 - c_{sh}$, 综合后得证。

3 应用实例

以某风电场 750 kW 并网风电机组相关参数及其性态为基础进行分析。为了更全面地对风电机组进行评判, 文中选取 4 种典型运行工况^[18]进行分析(功率较低区 s_1 、功率快速增加区 s_2 、功率持续增加区 s_3 、功率趋于稳定区 s_4), 其值见表 2。

表 2 系统状态表

Table 2 Table of system status

指标	s_1	s_2	s_3	s_4	理想状态	负理想状态
c_1	4.830	7.120	6.050	5.890	7.850	0.000
c_2	0.208	0.365	0.253	0.145	0.400	0.000
c_3	0.150	0.370	0.310	0.260	0.410	0.000
c_4	0.016	0.018	0.019	0.017	0.030	0.000
c_5	0.028	0.060	0.049	0.038	0.090	0.000
c_6	v_1	v_1	v_2	v_4	v_1	v_5
c_7	v_1	v_1	v_2	v_2	v_1	v_5
c_8	v_1	v_1	v_1	v_4	v_1	v_5
c_9	v_1	v_2	v_3	v_4	v_1	v_5
c_{10}	v_1	v_2	v_2	v_5	v_1	v_5

依据表 2, 结合式(4)–(7)分别求得各指标云模型的期望值、熵, 结果见表 3。

表 3 各指标的期望值及熵

Table 3 Expected value and the entropy of each indices

指标	期望值	熵	指标	期望值	熵
c_1	5.972 5	0.381 70	c_6	0.809 5	0.336
c_2	0.242 7	0.036 70	c_7	0.882 1	0.336
c_3	0.272 5	0.036 70	c_8	0.882 4	0.376
c_4	0.017 5	0.000 05	c_9	0.691 9	0.271
c_5	0.043 8	0.005 30	c_{10}	0.572 6	0.336

计算得到综合云重心向量 $T = (0.523\ 8, 0.020\ 6, 0.040\ 6, 0.001\ 1, 0.002\ 6, 0.062\ 5, 0.092\ 6, 0.080\ 8,$

$0.101\ 4, 0.075\ 9)$ 。

理想状态的综合云重心向量 $T^+ = (0.688\ 4, 0.034\ 0, 0.061\ 1, 0.002\ 0, 0.005\ 4, 0.077\ 2, 0.105\ 0, 0.091\ 6, 0.146\ 6, 0.132\ 5)$ 。

负理想状态的综合云重心向量 $T^- = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 。

对综合云重心向量 T 进行归一化处理, 得到向量 $T_g = (0.239\ 1, 0.394\ 1, 0.335\ 5, 0.450\ 0, 0.518\ 5, 0.190\ 4, 0.118\ 1, 0.117\ 9, 0.308\ 3, 0.427\ 2)$ 。由式(13)计算得出修正的加权偏离度 $\theta = 0.304\ 7$ 。将 θ 值输入定性评判云发生器后, 将激活良好和中等两个云模型, 激活良好云模型的程度大于中等云模型, 则该并网风电机组的性能分析结果为: “介于良好和中等之间, 倾向于良好”。

运用模糊综合评判法^[10]对该机组进行分析, 评判结果为良好, 与文中方法所得结论基本一致。该风电机组在 s_1, s_2, s_3 3 种典型运行工况下, 各评价指标接近或者是高于良好状态; 但是在 s_4 工况下机组性能下降, 部分指标偏离良好状态。结合各指标的权重信息, 将该机组性能状况评定为“介于良好和中等之间, 倾向于良好”是合理的。

计算各指标属性的灵敏度值, 结果见图 1。从图 1 可知, 尖速比、控制功能、调节功能、系统可靠性指标等 4 项指标的灵敏度相比其他指标的灵敏度都较大, 表明此 4 项指标的变化对风电机组运行状态评估结果影响较大, 与运行经验相符。在实际评估决策中, 对灵敏度较高的指标要予以特别关注。

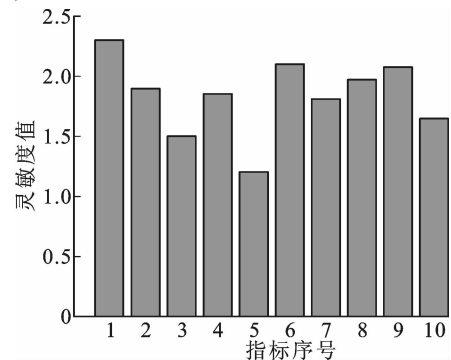


图 1 各指标的灵敏度

Fig. 1 Sensitivity value of each index

4 结语

文中创造性地将云理论引入并网风电机组性能分析评估中, 通过云重心评判法得出风电机组性能的语言评判值, 具有直观性和科学性。利用云模型有效地处理了定性概念和定量表示之间的相互转换, 最大限度地保留了研究对象的不确定性信

息,具有实用性和普适性。通过对某风电机组进行分析,并与模糊综合评判法进行比较,结果表明,云重心评判法所得评估结果与模糊评判结果吻合。云重心评判法较好地减少了人为主观因素的影响,使得风电机组性能评价更细致准确。推导和证明了基于云重心评判理论的评估指标属性值灵敏度分析计算公式,为管理者控制灵敏度高的指标参数提供了参考依据。进一步完善风电机组性能分析指标体系是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] 饶建业,徐小东,何肇,等. 中外风电并网技术规定对比[J]. 电网技术,2012,36(8):44-49.
RAO Jianye,XU Xiaodong,HE Zhao,et al. Comparison on technical regulations of China and other countries for grid-connection of wind farms[J]. Power System Technology, 2012,36(8):44-49.
- [2] 张红光,张粒子,陈树勇,等. 大容量风电场接入电网的暂态稳定特性和调度对策研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):45-51.
ZHANG Hongguang,ZHANG Lizi,CHEN Shuyong,et al. Studies on the transient behavior and dispatching strategy of power system integrated with large scale wind farms[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(31):45-51.
- [3] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(3):77-81.
CHI Yongning,LIU Yanhua,WANG Weisheng,et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology,2007,31(3):77-81.
- [4] 邢文琦,晁勤. 含不同风电机组的风电电网仿真研究[J]. 电网技术,2009,33(7):99-102.
XING Wenqi,CHAO Qin. Simulation study on wind power system containing various wind turbine generators[J]. Power System Technology,2009,33(7):99-102.
- [5] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4304-4314.
TANG Xisheng,MIAO Fufeng,QI Zhiping,et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4304-4314.
- [6] VALLEE F,LOBRY J,DEBLECKER O. System reliability assessment method for wind power integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3):1288-1297.
- [7] 范守婷,王政. 风力发电并网变流器同步技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(24):100-106.
FAN Shouting,WANG Zheng. Grid synchronization technology for grid converters of wind power generation[J]. Power System Protection and Control,2012,40(24):100-106.
- [8] LOPEZ J,GUBIA E,SANCHIS P,et al. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008,23(1):321-330.
- [9] 李辉,胡姚刚,唐显虎,等. 并网风电机组在线运行状态评估方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(33):103-109.
LI Hui,HU Yaogang,TANG Xianhu,et al. Method for on-line operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(33):103-109.
- [10] 王志国,马一太,杨昭,等. 风力发电机组性能分析的模糊综合评判方法[J]. 太阳能学报,2004,25(2):177-181.
WANG Zhiguo,MA Yitai,YANG Zhao,et al. Fuzzy comprehensive evaluation method of wind power generation unit[J]. Acta Energetica Sinica,2004,25(2):177-181.
- [11] 杨薛明,苑津莎,王剑锋,等. 基于云理论的配电网空间负荷预测方法研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(6):30-36.
YANG Xueming,YUAN Jinsha,WANG Jianfeng,et al. A new spatial forecasting method for distribution network based on cloud theory[J]. Proceedings of the CSEE,2006, 26(6):30-36.
- [12] 焦利明,于伟,罗均平,等. 云重心评判法的防空兵系统生存能力效能评估[J]. 火力与指挥控制,2007,32(5):102-105.
JIAO Liming,YU Wei,LUO Junping,et al. Evaluation on the effectiveness of air defense forces system viability based on membership cloud gravity center[J]. Fire Control and Command Control,2007,32(5):102-105.
- [13] LI Deyi. Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers journal of computer science and mathematics with application[J]. Elsevier Science,1998,35(3):99-123.
- [14] YANG X M,YUAN J S. Application of uncertainty reasoning based on cloud theory in spatial load forecasting[C]// IEEE Xplore Conference: Intelligent Control and Automation.[S.l.]:IEEE,2006:7567-7571.
- [15] 张目,周宗放. 改进的云重心评判法在高技术企业信用评价中的应用[J]. 数学的实践与认识,2010,40(19):37-44.
ZHANG Mu,ZHOU Zongfang. An improved MCGC and its application in credit evaluation of high-tech enterprises[J]. Mathematics in Practice and Theory,2010,40(19):37-44.
- [16] 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.
- [17] TRAIANTAPHYLLOU E,SABCHEZ A. Sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making

- 分析[J]. 电气制造, 2008, 9(10): 57-59.
- DI Qian, SHI Yanjie, YANG Fengyue. Calculation and analysis for the electric field of 145 kV composite bushing[J]. Electric Manufacture, 2008, 9(10): 57-59.
- [13] 张建宏. 环氧树脂浇注中内部应力产生的材料因素和防止措施[J]. 绝缘材料通讯, 1999(5): 344-347.
- ZHANG Jianhong. The shape factor of epoxy resin casting internal stress and prevent measures[J]. Insulating Materials, 1999(5): 344-347.
- [14] YAMADA N, YOKOSUKA S, MIKUNI K, et al. Development of next-generation switchgear targeting high reliability and maintenance savings[J]. Hitachi Review, 2009, 58(5): 208-212.
- [15] DL/T 1586—2016 12 kV 固体绝缘金属封闭开关设备和控制设备[S]. 2016.
- DL/T 1586—2016 Metal-enclosed switchgear and controlgear for 12 kV solid-insulated[S]. 2016.
- [16] 刘桂华, 周振业, 李水胜. 浅谈固体绝缘技术的应用[J]. 高压电器技术信息, 2012(6): 33-37.
- LIU Guihua, ZHOU Zhenye, LI Shuisheng. Talking about application of solid insulation technology[J]. Technical Review on High Voltage Apparatus, 2012(6): 33-37.
- [17] 李水胜, 刘桂华, 周振业. 固体绝缘表面屏蔽接地层的作用及注意事项[J]. 中国电业, 2014(6): 14-18.
- LI Shuisheng, LIU Guihua, ZHOU Zhenye. The functions and key points of shielded/earthed layer in solid insulated[J]. China Electric Power, 2014(6): 14-18.
- [18] 焦全平. 一种用于固体绝缘环网柜的气体间隙绝缘结构研究[J]. 中国电业, 2015(6): 66-68.
- JIAO Quanping. Research on gas insulated structure for solid insulation switchgear[J]. China Electric Power, 2015(6): 66-68.
- [19] 易平, 张重乐, 梁丽. 配电网中的固体绝缘环网柜研究[J]. 中国电业, 2014(6): 32-34.
- YI Ping, ZHANG Chongle, LIANG Li. Research on solid insulated ring main unit in power distribution grid[J]. China Electric Power, 2014(6): 32-34.
- 刘桂华(1965—), 男, 工程师, 研究方向为高压开关设备的结构和运行。
- 李水胜(1979—), 男, 工程师, 研究方向为固体绝缘技术应用。

(上接第 135 页)

- ing methods[J]. Decision Sciences, 1997, 28(1): 151-187.
- [18] 刘永前, 王飞, 时文刚, 等. 基于支持向量机的风电机组运行工况分类方法[J]. 太阳能学报, 2010, 31(9): 1191-1197.
- LIU Yongqian, WANG Fei, SHI Wengang, et al. Operation condition classification method for wind turbine based on support vector machine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(9): 1191-1197.
- 张心刚(1973—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为供用电技术。
- 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。