

基于改进加权灰关联分析法的风电机组可靠性研究

李玉洁, 方瑞明

(华侨大学信息学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 风电机组的可靠性评估可以为机组的可靠运行奠定基础。以风力发电机组液压系统为例, 运用故障树分析法, 并针对系统的灰色性及复杂性, 提出利用改进灰关联分析法融合故障树的可靠性分析方法。该方法针对人为设置分辨系数使结果趋于平均化的不足, 采用动态分辨系数确定原则, 有效扩大了关联度分布区间。同时, 为了更加符合实际工程需要, 引入关联熵作为权重系数。通过对各种故障模式的重要度进行排序, 找出系统的薄弱环节, 为预防事故的发生, 提高系统的可靠性提供理论依据。

关键词: 风力发电机组; 可靠性; 故障树分析; 动态分辨系数; 加权灰关联度

Reliability assessment for wind turbine based on weighted degree of improved grey incidence

LI Yujie, FANG Ruiming

(School of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Reliability assessment of wind turbines can lay a foundation for its reliable operation. Using hydraulic system of wind turbine as an example, according to the system's grey and complexity, a novel method is proposed by introducing the grey correlation analysis method into the fault tree analysis. This method adopts the dynamic identification coefficient principle instead of artificial setting 0.5, which expands the correlation distribution interval effectively. Also, factor weight coefficient is introduced to suffice the need of project. Application of this method shows that the importance of failure modes can be sorted and the weak link can be found. The results can be the theoretical basis of preventing accident and improving system reliability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177039).

Key words: wind turbine; reliability; fault tree analysis; dynamic identification coefficient; weighted degree of grey incidence

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0063-07

0 引言

风力发电机组是整个风电系统的核心设备, 若其发生故障, 会严重影响系统的正常运行, 对电网造成冲击, 降低供电可靠性, 给国民经济造成巨大的损失。当前风电机组的维修策略正由传统的“事故维修”和“定期维修”机制逐步向“查明根源, 精确维修, 一切基于可靠性”的主动维修机制转换^[1-4], 因此, 研究风力发电机组的可靠性, 对于提高风电系统运行安全、优化其维修策略都具有重要作用。

目前, 已有相关文献研究了基于马尔科夫过程^[5]、支持向量回归^[6]、序贯蒙特卡罗法^[7]等方法的风电机组可靠性评估策略, 其基本思路是通过分析风电机组的历史运行数据以及故障统计数据, 建立风电机组可靠性的动态评估模型。文献[8]则引入小世界网络理论对风电机组的故障传播机制进行建模, 并通过蚁群优化算法求得故障最高风险路径。前者能够对风电机组的可靠性进行量化评估, 而后者则侧重于对机组的薄弱环节进行定性分析。文献[9-10]则将工程可靠性评估领域应用较广的故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)应用于风电机组可靠性评估, 基于风电机组历史故障数据进行研究, 对故障进行层层分级, 由顶至底, 层次清晰, 可同时实现风电机组可靠性评估的定性和定量分析, 更适合于风电机组

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177039); 福建省自然科学基金项目(2012J01223); 厦门市重大科技创新项目(3502Z2011008)

组现场运维的工程需求。但是,该方法在具体应用时大多假定风电机组相关故障信息是已知的,机组各子系统或部件间的故障传播关系也是确定的。上述假定与风电机组的实际状态相距甚远,事实上,由于风电机组现有的状态监测系统(Condition Monitoring System, CMS)和数据采集与监控(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)系统的局限性,每次评估时仅能获取设备的部分信息^[11-14],进一步考虑到风电机组各子系统和元部件之间复杂的相互作用和交叉耦合关系,其故障传播机制更难以简单确定。

灰色关联分析理论是处理上述不确定关联性因素的一种有效方法^[15],利用灰色关联分析可将不确定性量化,使系统“白化”,从而准确找出风电机组的关键故障模式。因此,本文以风电机组故障树分析法为基础,分析故障间的关系,将灰色关联分析理论融合于故障树分析中,并对传统灰色关联分析方法进行动态分辨系数及熵权系数的改进,建立风电机组可靠性模型。通过该模型寻找风电机组的薄弱环节,为提高机组可靠性提供参考。

1 故障树分析

1.1 故障树建造

故障树法是一种由果到因的图形演绎方法,适用于大型复杂系统的可靠性、安全性分析以及风险评价。故障树的建造是故障树分析方法的关键,其完善程度对定性定量分析的准确性起着至关重要的作用。首先确定顶事件,然后找出中间故障事件,逐步向下分析寻找导致故障的诸因素及其之间的逻辑关系,并用故障树的图形符号(事件符号和逻辑门符号)表示各类故障组合与逻辑关系,直至分析到底事件^[16]。

1.2 故障树评估

故障树既可用于系统可靠性的定性分析,又可用于故障的定量评估。定性分析的目的在于找到最易造成顶事件发生的最小割集,辨识系统薄弱环节及影响可靠性的关键部件。定量分析则是根据底事件发生概率,根据各事件间的逻辑关系,求顶事件发生概率。

2 改进灰色关联分析模型及其在故障树中的应用

灰色关联分析是事物间诸多不确定因素关系的量化分析,它以系统的定性分析为前提,定量分析为依据,通过灰关联度的大小来定量衡量事物之间、因素之间的接近程度。灰色关联度大,则代表因素

在发展过程中,相对变化基本一致,两者关联程度大,反之亦然。

2.1 传统灰色关联分析模型在故障树中的应用

(1) 构造故障特征矩阵

故障树的顶事件为 T , 底事件个数为 n , $X_i(i=1,2,\dots,n)$ 表示底事件, 最小割集个数为 m , $K_j(j=1,2,\dots,m)$ 表示最小割集, 则故障特征矩阵可表示为

$$K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \vdots \\ K_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \cdots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $x_k(i)$ 表示第 k 类故障模式下第 i 个基本事件数据。当基本事件 X_i 出现在最小割集 K_k 中时, 取 $x_k(i)=1$; 否则, 取 $x_k(i)=0$ 。

(2) 确定参考列及比较列

底事件 j 的重要度定义为, 由该底事件发生影响顶事件发生概率的系数, 其可表示为

$$e_j = \frac{\sum_{j \in K_i} Q_i}{Q_s} \quad (2)$$

式中: Q_s 为顶事件发生的概率; Q_i 为第 i 个最小割集发生的概率; 分子为所有包含第 j 个底事件的最小割集发生的概率之和。

将 n 个底事件的重要度进行归一化后, 组成参考列 X_0 。

特征矩阵 K 中的每一个特征向量作为一个比较列。

(3) 计算灰关联系数及灰关联度

灰关联系数为

$$\varepsilon[X_0(i), x_k(i)] = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0k}(i) + \rho \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式(3)中, ρ 为分辨系数, 一般取 0.5,

$$\Delta_{0k}(i) = |X_0(i) - x_k(i)|$$

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_k \Delta_{0k}(i)$$

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_k \Delta_{0k}(i)$$

灰关联度的计算公式为

$$\gamma_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon[X_0(i), x_k(i)] \quad (4)$$

最后, 对 m 个灰关联度进行大小比较并排序, 灰关联度越大的故障模式造成顶事件发生的可能性越大, 反之则造成顶事件发生的可能性越小。

2.2 改进的灰色关联分析模型

(1) 传统灰关联分析模型的不足

由公式(3)可以看出, 分辨系数 ρ 与 Δ_{\max} 的乘积

对于整个公式的值有较大的影响, ρ 的取值反映了系统 Δ_{\max} 因子对关联度的间接影响程度, ρ 不同则关联度不同。传统方法中人为设置 ρ 为 0.5, 将导致计算结果趋于平均化, 同时减小关联度的分布区间, 降低区分度。

分析公式(4)可看出, 传统分析模型中以各点灰关联系数的等权平均数作为灰关联度, 但在实际工程应用中, 系统各序列在不同点的关联系数对于系统主行为序列的影响是不同的, 因此在计算灰关联度的公式中, 需加上权重系数。

(2) 动态分辨系数的确定

对于分辨系数 ρ , 灰关联度序列 Γ 是其函数, ρ 的大小直接影响关联度序列的信息分辨程度, 而这种分辨程度可以用差异信息序列的熵来刻画, 记为 $g(\rho)$ 。若用 $V = \{v_k | k \in m\}$ 表示归一化后的关联度序列, 则

$$g(\rho) = -\sum_{k=1}^m v_k \ln v_k \quad (5)$$

根据差异信息理论, 一个序列的差异信息熵越小, 则此序列中各个分量的差异信息就越大, 序列的信息分辨程度就越高^[17]。

差异信息的熵函数 $g(\rho)$ 在 $\rho \in (0,1)$ 范围内, 具有上凸性和非负性, 且符合熵增加定理, 即任何驱使 v_k 平稳的变动都会使熵增加。

分辨系数 ρ 应根据实际观测序列的具体情况动态取值: 当观测序列出现奇异值时, 应选取 ρ 值使得差异信息熵增大, 用来克服奇异值的支配作用; 当观测序列比较平稳时, 选取的 ρ 值则应使差异信息熵较小, 增加序列的分辨度, 体现关联度的整体性。

定义

$$\Delta v(i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta_{0k}(i), \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\Delta}(i) = \frac{\Delta v(i)}{\Delta_{\max}} \quad (7)$$

结合上述理论与文献[18]中的分辨系数选取原则, 记动态分辨系数为 $\rho^{(i)}$, 则

1) 当 $\Delta_{\max} > 3\Delta v(i)$ 时, 有

$$\varepsilon_{\Delta}(i) < \rho^{(i)} < 1.5\varepsilon_{\Delta}(i)$$

此时观测序列有异常值, 为了抑制 Δ_{\max} 对关联度的支配作用, 应增大差异信息熵, 根据函数的单调性可知, 此时应选取右边极限, 即 $\rho^{(i)} = 1.5\varepsilon_{\Delta}(i)$ 。

2) 当 $2\Delta v(i) \leq \Delta_{\max} \leq 3\Delta v(i)$ 时, 有

$$1.5\varepsilon_{\Delta}(i) \leq \rho^{(i)} \leq 2\varepsilon_{\Delta}(i)$$

此时观测序列较平稳, 为了增大序列的分辨度, 更好地体现关联度的整体性, 应减小差异信息熵,

根据函数单调性知, 此时应选取左半边极限, 即 $\rho^{(i)} = 1.5\varepsilon_{\Delta}(i)$ 。

3) 当 $0 < \Delta_{\max} < 2\Delta v(i)$ 时, 有

$$\rho^{(i)} \in [0.8, 1]$$

同样地, 这时候的观测序列较为平稳, 因此应选取左半边极限, 即 $\rho^{(i)} = 0.8$ 。

用动态分辨系数 $\rho^{(i)}$ 替代式(3)中的静态分辨系数 ρ , 得到具有动态系数的新的关联系数计算公式为

$$\varepsilon'[X_0(i), x_k(i)] = \frac{\Delta_{\min} + \rho^{(i)}\Delta_{\max}}{\Delta_{0k}(i) + \rho^{(i)}\Delta_{\max}} \quad (8)$$

(3) 基于熵权优化的加权系数确定

各序列在不同点的关联系数对系统行为的重要程度是不一样的, 整体的接近性和相似程度以局部点关联系数为基础, 因此定义带权重系数的关联度计算公式为

$$\gamma_k' = \sum_{i=1}^n \omega_{ki} \varepsilon_{0k}'(i) \quad (9)$$

其中, ω_{ki} 是第 k 行 i 点的权重系数, 且满足条件

$$\sum_{i=1}^n \omega_{ki} = 1$$

权重系数表示不同序列点的相对重要程度, 反映了其对整体关联度的影响, 我们希望这种影响是均衡客观的, 因此采用熵权法来对关联系数的权重赋值。参照文献[19]中熵权法赋值过程, 本文对灰色关联熵赋予极大化约束, 并通过构造拉格朗日函数推导计算, 得到计算系数矩阵为

$$\mathbf{E}_k = \begin{bmatrix} \varepsilon_{0k}'(1) & -\varepsilon_{0k}'(2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{0k}'(2) & -\varepsilon_{0k}'(3) & 0 & 0 \\ & & \ddots & & \\ & & & \varepsilon_{0k}'(n-1) & -\varepsilon_{0k}'(n) \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

则权重向量 \mathbf{W}_k 为

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{E}_k^{-1} \mathbf{b} \quad (10)$$

式中, $\mathbf{b} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T$ 。

由计算系数矩阵 \mathbf{E}_k 的行列式可知, 其值大于 0, 因此线性方程组(10)存在唯一解, 此解即为所求权重向量值。

综合以上改进方法, 改进后的灰色关联分析模型的关联度计算公式为

$$\gamma_k' = \sum_{i=1}^n \omega_{ki} \varepsilon_{0k}'(i) \quad (11)$$

3 应用实例

风力发电机组在风力发电系统中起着重要的作

用。大型风力发电机是一个融机械、电磁、绝缘、散热等为一体的非线性、强耦合系统，一个部件出现异常，将可能导致整个发电过程中断，这导致了风力发电机组故障种类繁多、故障原因复杂、故障征兆模糊、故障机理不清等问题。以上各原因造成了风电机组故障系统具有灰色性，即不确定性，给故障分析造成一定的困难。因此，传统的可靠性分析方法已不能满足要求。

风电机组的液压系统主要用于控制叶尖制动系统的动作和机械刹车。其结构复杂、动作频繁，且其运行状况直接影响制动刹车系统，对风电机组的安全具有至关重要的作用。因此本文依据风力发电机组历史故障统计数据，建立液压系统的故障树，利用上述改进加权灰色关联方法对故障树进行分析，找出最易导致故障发生的故障模式。

3.1 建立故障树

风力发电机组液压系统故障树结构如图 1 所示。

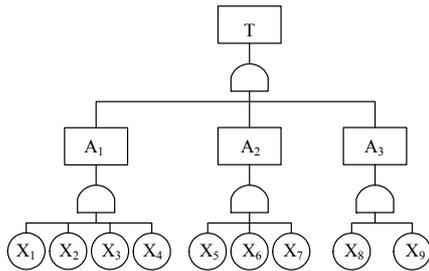


图 1 液压系统故障树

Fig. 1 Fault tree of hydraulic system

故障树的顶事件 T 表示液压系统故障，中间事件 A₁ 表示液压站本体故障，A₂ 表示液压泵故障，A₃ 表示电气元件故障，基本事件 X₁~X₉ 含义如表 1 所示。

3.2 求故障树最小割集

采用下行法求解最小割集，可见故障树的每个基本事件就构成一个最小割集，即 $K_1=\{X_1\}$ ， $K_2=\{X_2\}$ ， $K_3=\{X_3\}$ ， $K_4=\{X_4\}$ ， $K_5=\{X_5\}$ ， $K_6=\{X_6\}$ ， $K_7=\{X_7\}$ ， $K_8=\{X_8\}$ ， $K_9=\{X_9\}$ 。

表 1 基本事件含义及发生概率

Table 1 Meaning of elementary events and occur probability

代号	基本事件	发生概率
X ₁	液压系统油位低	0.021 4
X ₂	建压超时	0.011 5
X ₃	机械刹车压力低	0.003 3
X ₄	刹车液压故障	0.002 7
X ₅	液压泵工作超时	0.004 4
X ₆	液压泵过载	0.004 4
X ₇	液压泵工作频繁	0.024 6
X ₈	电路断路器故障	0.011 5
X ₉	电路开关故障	0.006 0

3.3 确定基本事件发生概率及重要度

根据某风电场 2007~2009 年故障历史统计数据，求得各基本事件发生概率如表 1 所示。

由公式(2)求得各基本事件重要度如表 2 所示。

表 2 各基本事件的重要度

Table 2 Importance of elementary events

事件	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
e _i	0.247 4	0.132 9	0.038 2	0.031 2	0.050 9
事件	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	
e _i	0.050 9	0.284 4	0.132 9	0.069 4	

3.4 确定参考列和比较列

对基本事件的重要度归一化，得参考列 X₀ 为

$$X_0 = [1, 0.5372, 0.1544, 0.1261, 0.2057, 0.2057, 1.1496, 0.5372, 0.2805]$$

由特征矩阵可得各比较列为

$$K = \begin{matrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \\ K_7 \\ K_8 \\ K_9 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.5 用传统方法计算灰关联系数及灰关联度

根据式(3)可求得灰关联系数如表 3 所示。

表 3 传统灰关联系数

Table 3 Traditional grey correlation coefficients

ϵ	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9
k=1	1	0.516 9	0.788 3	0.820 1	0.736 5	0.736 5	0.333 3	0.516 9	0.672 0
k=2	0.365 0	0.554 0	0.788 3	0.820 1	0.736 5	0.736 5	0.333 3	0.516 9	0.672 0
k=3	0.365 0	0.516 9	0.404 7	0.820 1	0.736 5	0.736 5	0.333 3	0.516 9	0.672 0
k=4	0.365 0	0.516 9	0.788 3	0.396 8	0.736 5	0.736 5	0.333 3	0.516 9	0.672 0
k=5	0.365 0	0.516 9	0.788 3	0.820 1	0.419 8	0.736 5	0.333 3	0.516 9	0.672 0
k=6	0.365 0	0.516 9	0.788 3	0.820 1	0.736 5	0.419 8	0.333 3	0.516 9	0.672 0
k=7	0.365 0	0.516 9	0.788 3	0.820 1	0.736 5	0.736 5	0.793 5	0.516 9	0.672 0
k=8	0.365 0	0.516 9	0.788 3	0.820 1	0.736 5	0.736 5	0.333 3	0.554 0	0.672 0
k=9	0.365 0	0.516 9	0.788 3	0.820 1	0.736 5	0.736 5	0.333 3	0.516 9	0.444 1

提供了理论依据。

(2) 本文对灰色关联分析算法进行改进,通过灰关联度差异信息熵确定动态分辨系数,解决了传统算法中人为设置 $\rho=0.5$ 使结果趋于平均化的问题,有效抑制了观测序列奇异值的影响,使算法整体性提升。同时权重系数的引入解决了局部点关联系数控制整个灰色关联序的问题,使得算法更注重区分各事件的重要度,更符合实际工程的应用。

(3) 该方法同时考虑系统的复杂性和灰色性,在建立较为完善健全的故障树后,可对整个系统以及各子系统进行深度的整体的可靠性评估。本文中的基本理论和算法可推广至其他复杂机电设备中使用。

参考文献

- [1] 杭俊, 张建忠, 程明, 等. 风力发电系统状态监测和故障诊断技术综述(英文)[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 261-271.
HANG Jun, ZHANG Jianzhong, CHENG Ming, et al. An overview of condition monitoring and fault diagnostic for wind energy conversion system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 261-271.
- [2] LU Bin, LI Yaoyu, WU Xin, et al. A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis[C] // 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications. Lincoln, NE, United States, 2009.
- [3] 余民, 杨宸, 蒋传文, 等. 风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 100-135.
YU Min, YANG Chen, JIANG Chuanwen, et al. Study on power system reliability and reserve optimization with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 100-135.
- [4] FISCHER K, BESNARD F, BERTLING L. Reliability-centered maintenance for wind turbines based on statistical analysis and practical experience[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(1): 184-195.
- [5] 李大字, 冯园园, 刘展, 等. 风力发电机组可靠性建模与维修策略优化[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 122-127.
LI Dazi, FENG Yuanyuan, LIU Zhan, et al. Reliability modeling and maintenance strategy optimization for wind power generation sets[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 122-127.
- [6] 梁颖, 方瑞明. 基于 SCADA 和支持向量回归的风电机组状态在线评估方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 7-12, 31.
LIANG Ying, FANG Ruiming. An online wind turbine condition assessment method based on SCADA and support vector regression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 7-12, 31.
- [7] 刘文霞, 蒋程, 张建华, 等. 一种用于序贯蒙特卡罗仿真的风电机组多状态可靠性模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 73-80.
LIU Wenxia, JIANG Cheng, ZHANG Jianhua, et al. A multistage reliability model of wind turbines for sequential Monte Carol simulation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 73-80.
- [8] 史金瑶, 方瑞明, 卢小芬, 等. 基于小世界网络的双馈感应风力发电系统故障传播特性研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 25-29.
SHI Jinyao, FANG Ruiming, LU Xiaofen, et al. Analysis on failure propagation characteristics of double-fed induction wind power generation system based on small-world network[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 25-29.
- [9] 顾煜炯, 宋磊, 刘佳, 等. 基于 FMECA 和 FTA 正向综合分析的风电场设备故障管理[J]. 可再生能源, 2012, 30(9): 100-105.
GU Yujiong, SONG Lei, LIU Jia, et al. Fault management of wind farm equipment based on FMECA and FTA positive analysis[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(9): 100-105.
- [10] 杨明明. 大型风电机组故障模式统计分析 & 故障诊断 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
YANG Mingming. Fault mode statistic & analysis and failure diagnosis of large-scale wind turbines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [11] 陈雪峰, 李继猛, 程航, 等. 风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究与进展[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 45-52.
CHEN Xuefeng, LI Jimeng, CHENG Hang, et al. Research and application of condition monitoring and fault diagnosis technology in wind turbines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9): 45-52.
- [12] HAMEED Z, HONG Y S, CHO Y M, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1): 1-39.
- [13] 蒋程, 张建华, 刘先正, 等. 计及运行工况的风电机组停运模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24):

- 112-116.
JIANG Cheng, ZHANG Jianhua, LIU Xianzheng, et al. Wind turbine outage model based on operation conditions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 112-116.
- [14] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风电机组机电耦合与轴系稳定的分析与辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 134-139.
HAO Zhenghang, YU Yixin. Analysis and identification for electromechanical coupling and shaft stability of double-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 134-139.
- [15] 杨良军, 熊小伏, 张媛. 基于灰色关联度和理想解法的电力设备状态维修策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 74-78.
YANG Liangjun, XIONG Xiaofu, ZHANG Yuan. Research on condition-based maintenance of electric power equipment based on grey correlation degree and TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 74-78.
- [16] 朱晋, 韦统振, 霍群海. A2MC VSC-HVDC 系统可靠性分析与冗余度优化研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 319-323.
ZHU Jin, WEI Tongzhen, HUO Qunhai. Reliability model analysis and redundancy design of A2MC VSC-HVDC power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 319-323.
- [17] 张岐山. 灰朦胧集的差异信息理论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [18] 东亚斌, 段志善. 灰色关联度分辨系数的一种新的确定方法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4): 589-592.
DONG Yabin, DUAN Zhishan. A new determination method for identification coefficient of grey relation grade[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 589-592.
- [19] 王正新, 党耀国, 曹明霞. 基于灰熵优化的加权灰色关联度[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 774-783.
WANG Zhengxin, DANG Yaoguo, CAO Mingxia. Weighted degree of grey incidence based on optimized entropy[J]. System Engineering and Electronics, 2010, 32(4): 774-783.

收稿日期: 2014-10-13; 修回日期: 2014-11-18

作者简介:

李玉洁(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电气装置在线监测与故障诊断; E-mail: 49983616@qq.com

方瑞明(1972-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电气装置在线监测与故障诊断、智能技术在电力系统中的应用等。E-mail: fangrm@126.com

(编辑 周金梅)