

# 基于周期性预防维修的风电场备件成本分析

张再峰, 张 琛, 郭 盛, 高 伟, 黄树红, 杨 涛

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 针对风电场中的可修组件, 基于周期性预防维修策略, 建立采用连续检查的 $(R, Q)$ 库存控制策略的风电场备件模型, 模型中考虑不完全维修与随机故障对备件需求的影响。采用离散事件仿真法对模型进行求解, 算例分析在某一确定维修策略下, 不同的再订购点和订货量对备件成本及其服务水平的影响; 并给出几组不同单位成本配置下的最优备件订购决策, 结果表明, 单位订购成本的变化对再订购点的选择有较大影响。

**关键词:** 风电场; 备件; 周期性维修; 离散事件仿真

**中图分类号:** TK83

**文献标识码:** A

## 0 引 言

备品备件是为了缩短检修时间而事先准备供检修时更换的零部件。从其定义可看出, 备件的订购与检修是密不可分的。备品备件的合理配置是检修顺利进行的前提, 而检修又是进行备品备件订购的依据<sup>[1]</sup>。

目前, 国内外针对风电场备件管理的研究大多是离开维修策略单独考虑备件。伍孟轩等<sup>[2]</sup>针对风电场备件的特殊性, 结合 ABC 分类法和 3A 分类法, 提出 AB2C 分类方法。齐二石等<sup>[3]</sup>假设需求量服从泊松分布, 以其期望值作为需求量输入进行建模。在其他领域中, 已有许多学者研究了各种维修与备件联合优化的问题。Wang Yabin 等<sup>[4]</sup>研究了基于状态维修(CBM)与 $(S-1, S)$ 备件订购策略的联合决策模型; Wang Ling 等<sup>[5]</sup>建立了考虑不确定性失效的劣化系统的状态维修与备件订购联合优化仿真模型; Van Horenbeek 等<sup>[6]</sup>针对维修与库存联合优化系统作了综述, 从维修策略、库存策略、提前期、目标函数以及优化方法等多个方面介绍了当前的研究现状。

本文在上述研究基础上, 针对风电场中的可修组件, 将考虑不完全维修的周期性预防维修作为维修决策。建立以备件总成本的平均费率最小为目标函数, 以备件的平均服务水平为约束条件, 以再

订购点和订购量为决策变量的 $(R, Q)$ 备件订购策略模型。采用离散事件仿真法对模型进行求解, 算例中分析了备件成本分布规律以及备件单位成本变化对最优订购策略的影响。

## 1 系统模型

### 1.1 模型假设

风电场的实际情况较为复杂, 模型的建立不可能一蹴而就, 故本文将围绕以下假设进行研究:

1) 假设提前期(即从发出订单到备件到达的时间)是固定的, 不随备件订购数量而改变, 也不受运输过程中的随机因素影响。设提前期为  $LT$  天。

2) 供应商不存在缺货情况, 企业不存在资金不足情况。

3) 假设风电场设备总台数为  $SE$  台, 且仅当缺货时才会造成停机。

4) 假设安全库存量为  $SS$  件, 即当库存小于  $SS$  件就发出订单。

5) 只考虑风场一级库存情况。

6) 假设风力机设备故障率服从威布尔分布。

7) 设备更换及维修时间忽略不计, 备件始终为全新备件。

### 1.2 周期性预防维修策略

本文采用周期性预防维修, 以设备当前的可靠

收稿日期: 2016-03-15

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAA06B02)

通信作者: 杨 涛(1978—), 男, 博士、副教授, 主要从事旋转机械(风力机)状态监测和故障诊断方面的研究。hust\_yt@mail.hust.edu.cn

度作为维修决策的输入。设预防性维修的检修周期为  $PT$ , 更换阈值为  $R_1$ , 不完全维修阈值为  $R_2$ 。周期性预防维修决策可描述如下:

若到达预防维修周期, 检查设备的可靠度  $R(t)$  是否到达更换阈值  $R_1$ 。若达到, 则更换设备, 并且令设备实际役龄  $ti=0$ ; 若在更换阈值  $R_1$  和不完全维修阈值  $R_2$  之间, 则不更换设备, 设备实际役龄  $ti=ti-t_{new}$ 。其中  $t_{new}$  为设备役龄回复尺度, 表征不完全维修的修复程度; 若  $R(t)<R_2$ , 则表示设备完好, 无需维修。

设备役龄回复尺度  $t_{new}$  可用式(1)进行求解:

$$\begin{cases} C_{pmi} = C_f ti + \omega \cdot (C_b - C_f) \cdot \lambda(ti) \\ \delta_i = \left( a \cdot \frac{C_{pmi}}{C_b} \right) \\ t_{new} = \delta_i \cdot ti \\ ti = ti - t_{new} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $C_{pmi}$  ——第  $i$  次不完全维修的成本;  $C_f$  ——不完全维修的固定成本(检查成本);  $\omega$  ——故障调节系数;  $C_b$  ——设备订购成本, 即更换成本;  $\lambda(ti)$  —— $ti$  时刻的故障率;  $\delta_i$  ——第  $i$  次不完全维修的回复因子;  $a$  ——成本调节系数;  $b$  ——时间调节系数;  $c$  ——学习效应调节系数,  $c = \ln \varphi / \ln 2$ ,  $\varphi$  为经验曲线百分率;  $t_{new}$  ——设备役龄回复尺度。

式(1)是在卓明良等<sup>[7]</sup>的回复因子模型基础上, 结合风电场的实际情况, 本文进行了一些改良。根据风电场的实际情况, 进行不完全维修的修复程度主要与不完全维修的相对成本有关, 投入的不完全维修成本越高, 修复程度越大, 系统越健康; 而该相对成本又跟设备的故障率有关, 故障率越高, 则所需的不完全维修成本越大。

### 1.3 备件库存订购策略

备件库存订购策略如图1所示。由1.2节的维修策略可得到更换维修、不完全维修、小限度维修、不维修4种维修结果。若维修结果为更换维修, 则检查是否在订购期, 订购备件是否到货; 若到货, 则当前库存量  $Q=Q+OQ$ , 其中  $OQ$  表示进货量; 否则  $Q$  不变。再检查库存情况, 若  $Q>0$ , 则  $Q=Q-1$ ; 否则设备停机, 故障率为无效值。同时检查是否满足订货条件, 若满足, 则发出订单, 并置为订购状态(避免重复订货)。

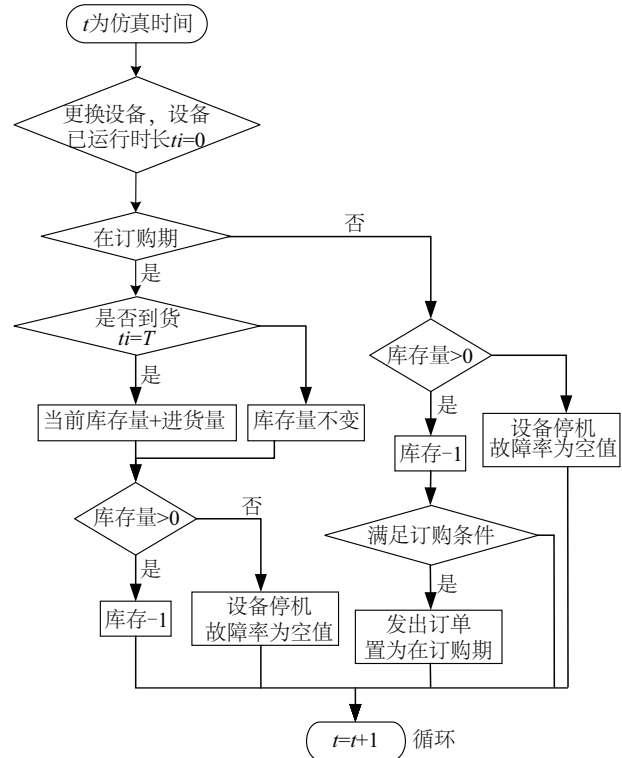


图1 备件订购策略流程图

Fig. 1 Spare parts ordering policy flowchart

本文采用连续检查的  $(R, Q)$  库存控制策略, 即当剩余库存量  $Q < SS$  (再订购点) 时, 发出订单, 订货量为定值  $OQ$ 。

该备件库存订购策略考虑了由于备件缺货导致设备停机的情况。

### 1.4 目标函数

本文以单个设备的备件平均总成本最小为目标, 以备件服务水平  $A$  为约束, 寻找在某一特定维修策略下的最优备件订购策略。由第1节介绍的联合策略可看出, 维修策略主要由预防性维修周期  $PT$ 、更换阈值  $R_1$ 、不完全维修阈值  $R_2$  确定; 备件订购策略则主要由再订购点  $SS$  和订货量  $OQ$  决定。最佳策略的寻求问题可描述为如下带约束的优化问题:

$$\begin{aligned} \min EC_{\infty} &= \min f_{EC}(PT, R_1, R_2, SS, OQ) \\ \text{s.t.} \quad &PT = 1, 2, 3, \dots; \\ &0 < R_1 < R_2 < 1; \\ &OQ = 1, 2, 3, \dots, N_1; \\ &SS = 0, 1, 2, 3, \dots, N_2; \\ &A \geq 95\%; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{cases} f_{EC}(PT, R_1, R_2, SS, OQ) = \frac{C_{stock} + C_{stop} + C_{order}}{N \cdot T} \\ C_{stock} = \sum_{i=1}^T Q_i \cdot c_1 \\ C_{stop} = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N St_{i,j} \cdot c_2 \\ C_{order} = \sum_{i=1}^k OQ_i \cdot c_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $f_{EC}(PT, R_1, R_2, SS, OQ)$  ——在一组决策变量作用下的备件订购平均费用率;  $T$  ——仿真总时长;  $N$  ——总设备数;  $C_{stock}$ 、 $C_{stop}$ 、 $C_{order}$  —— $T$  天  $N$  台设备的总储存成本、缺货成本、订购成本;  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  ——与之相对应的单位成本;  $Q_i$  ——第  $i$  天的剩余库存量;  $k$  ——进货总次数;  $OQ_i$  ——第  $i$  次进货的进货量;  $St_{i,j}$  ——第  $i$  天第  $j$  台设备是否停机(用 0 和 1 表示)。

本文仅考虑备件库存满足维修需求的情况。因此,服务水平  $A$  可用式(4)表示:

$$A = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N St_{i,j}}{\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N ex_{i,j}} \quad (4)$$

if  $t = nT, (n = 1, 2, 3, \dots)$  且  $rand(0, 1) < \lambda(ti)$

$$ex_{N,t} = \begin{cases} 1 & R(ti) \leq R_1 \\ 0 & R(ti) > R_1 \end{cases}$$

else  $ex_{N,t} = 0$

式中,分子表示系统停机的次数;分母表示产生需求的总次数;  $ex_{N,t}$  ——第  $t$  时刻第  $N$  台设备需要更换的情况,  $ex = 0$  表示无需更换,  $ex = 1$  表示需要更换;  $St_{i,j}$  ——第  $i$  天第  $j$  台设备是否停机,  $St_{i,j} = 1$  表示设备停机。该服务水平模型即表示了需求得到满足的次数与总需求数量之比。

## 2 模型求解

从维修策略以及备件订购策略流程图可看出,模型以不同离散时刻的可靠度和故障率作为设备状态样本,触发不同离散时刻下的各类决策事件,从而更新不同时刻的库存量及备件订购情况。模型中的统计量和费用成本等均由不同离散时刻触发的事件产生,整个系统的模型可运用离散事件仿真方法进行求解。

离散事件仿真以每台设备每天为单位进行,当仿真到任意时刻  $t_i$  ( $t_i = i\Delta t, i = 1, 2, 3, \dots, T$ ),任意设

备  $N_j (j = 1, 2, 3, \dots, NE)$  时:

首先继承  $t_{i-1}$  时刻的系统状态,包括设备实际已运行时长  $ti_{i-1,j-1}$ 、停机标志  $St_{i-1,j-1}$ 、更换标志  $ex_{i-1,j-1}$ 、订购标志  $O_{-f,i-1,j-1}$ 、剩余库存量  $Q_{i-1,j-1}$ 、到货时间  $OT_{i-1}$  以及订购次数  $k_{j-1}$ ;

然后通过设备实际已运行时长,计算出  $N$  个设备在第  $j$  个单位时间内的故障率  $\lambda(ti_{i-1,j-1})$  及可靠度  $R(ti_{i-1,j-1})$ ,并结合系统当前的状态来触发或安排相应的事件。

在整个仿真过程中会涉及到的离散事件如下:

1) 周期性预防维修检测事件

$t = n \cdot PT, n = 1, 2, 3, \dots$  时触发。统计设备当前可靠度  $R(ti)$ 、故障率  $\lambda(ti)$ ,并根据设备的状态安排维修事件,更新设备更换标志  $ex_{i,j}$ 。

2) 随机故障事件

$rand(0, 1) < \lambda(ti)$  时触发。根据设备当前可靠度  $R(ti)$  安排维修事件,根据式(4)更新设备更换标志  $ex_{i,j}$ 。

3) 不完全维修事件

$R_1 \leq R(ti) \leq R_2$  时触发。统计仿真  $t$  时刻对应的设备故障率  $\lambda(ti)$ 、不完全维修成本  $C_{pmi}$ ,更新设备实际役龄  $ti$ 。

4) 更换维修事件

$ex_{i,j} = 1$  时触发。根据当前库存状态完成更换维修,根据新的库存状态触发新的订购和修理事件。

$$\begin{aligned} & \text{if } Q_i > 0 \\ & \quad ti = 0 \\ & \quad Q_i = Q_i - 1 \\ & \quad St_{i,j} = 0 \\ & \text{else} \\ & \quad ti = NaN \\ & \quad Q_i = 0 \\ & \quad St_{i,j} = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

5) 备件订购事件

$O_{-f} = 0$  且  $Q_i \leq SS$  时触发。 $O_{-f}$  为订购标志,取值为 0 和 1,其中  $O_{-f} = 0$  表示未安排订货。更新到货时间  $OT = t + LT$ ,更新订购次数  $k = k + 1$ ,更新  $O_{-f} = 1$ 。

6) 新备件到达事件

$t = OT$  时触发。首先统计  $t_i$  时刻的停机总数  $N_{stop}^i$

$$N_{\text{stop}}^i = \sum_{j=1}^N St_{i-1,j} \quad (6)$$

然后对停机设备进行更换。若  $N_{\text{stop}}^i \geq OQ$ , 则剩余库存量  $Q_i = Q_{i-1} + OQ - N_{\text{stop}}^i$ ,  $O\_f = 0$ , 并更新对应设备的停机标志  $St_{i,j}$  以及设备实际已运行时长  $ti$  均为 0; 否则订购的设备仍无法满足缺货需求, 剩余库存量  $Q_i = 0$ , 保持未被更换的设备停机标志  $St_{i,j}$  为 1,  $ti = NaN$ ; 其他已被更换的设备的  $St_{i,j}$  为 0,  $ti = 0$ 。最后更新  $O\_f = 0$ 。

### 3 算例分析

#### 3.1 成本分布情况

本文研究目的在于找到不同成本配置对订购策略的影响, 并非针对某种特定备件。为了便于分析, 选取某一参数下的故障分布作为备件的基本属性, 选取某一维修阈值及维修周期作为维修决策。根据文献[8,9]选取齿轮箱的威布尔分布尺度参数  $\alpha = 2400$ , 形状参数  $\beta = 3$ 。由文献[10]选取齿轮箱的更换阈值  $R_1 = 0.9$ ; 不完全维修阈值  $R_2 = 0.95$ 。假设预防性维修周期  $PT = 180$  d; 备件的订购提前期  $LT = 90$  d。仿真总时长(单次仿真周期)  $T = 365 \times 15$  d; 总设备数  $N = 40$  台。仿真总次数  $NS = 24$  次。假设不完全维修的成本调节系数  $a = 1$ ; 时间调节系数  $b = 0.4$ ; 学习效应调节系数  $c = \lg(0.9)/\lg(2)$ ; 经验系数  $d = 4$ ; 故障调节系数  $\omega = 3$ 。

为了消除单位成本的变化对实验结果的影响, 首先假设单位存储成本  $c_1$ 、单位缺货成本  $c_2$ 、单位订购成本  $c_3$  均相等。计算再订购点为 1~20, 订货量为 1~30 时各点的成本, 可得到总成本分布、缺货损失分布、订货成本分布以及储存成本分布图, 如图 2~图 5 所示。

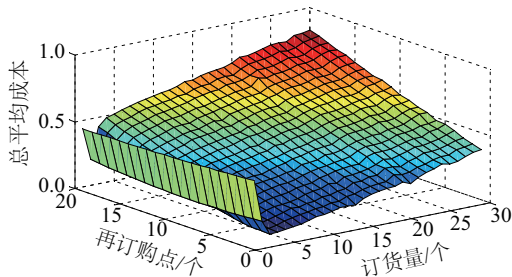


图2 总成本分布图

Fig. 2 Total cost distribution diagram

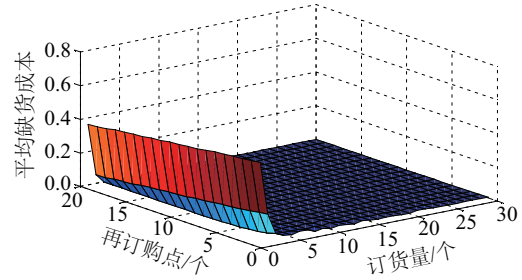


图3 缺货损失分布图

Fig. 3 Stock out cost distribution diagram

图 4 的订货成本的纵坐标最大值为  $8 \times 10^{-4}$ , 与其他成本相差 4 个数量级, 因此, 在各单位成本均相同的情况下, 订货成本对总成本的影响很小。图 2 中总成本沿订货量方向的变化趋势为先减小, 后变大; 结合图 3 和图 5 不难看出, 先减小部分主要受缺货损失的影响, 后变大的部分主要受储存成本的影响。

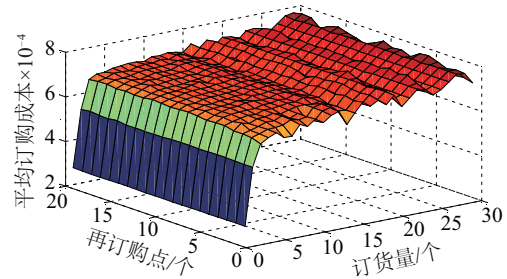


图4 订货成本分布图

Fig. 4 Ordering cost distribution diagram

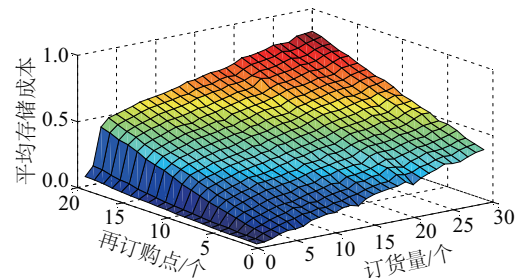


图5 储存成本分布图

Fig. 5 Stocking cost distribution diagram

由于各成本分布沿订货量方向的变化较为明显, 因此, 单独选择某一再订货点下的各成本分布图来进行分析。为了在图中更清楚地区分总成本与其他成本, 将单位订货成本放大 100 倍。当再订购点为 6 时的成本分布规律如图 6 所示。该图反映的成本变化规律也符合理论上的各项库存成本



的悖反关系。

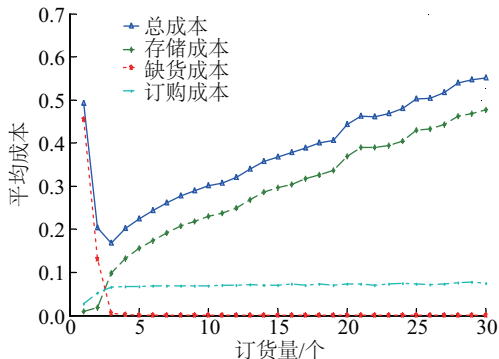


图6 再订购点为6时的成本分布图  
Fig. 6 Cost distribution diagram in Reorder point=6

图7为备件的服务水平分布图,表征备件对于系统需求的满足程度,再订购点越大,订货量越多,服务水平越高。由备件的服务水平数学模型可知,备件的服务水平仅与订货策略有关,与单位成本无关。因此,在通过单位成本配置计算出总成本分布后,还应对照备件服务水平分布图,选择符合备件服务水平要求的成本最低点,作为备件订购的最优决策。

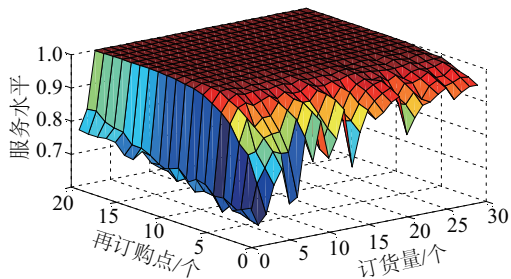


图7 备件服务水平分布图  
Fig. 7 Spare parts service level distribution diagram

3.2 最优订货决策

3.1 节中仅分析了单位成本为 1:1 时的备件成本分布特点。在实际情况下,各单位成本必定会有所不同。本节选取备件服务水平  $A \geq 0.9$ , 并根据 1.4 节的模型,计算不同单位成本配置下的最优备件订购决策。选取其中几组计算结果,如表 1 所示。表 1 中  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  分别表示单位存储成本、单位缺货成本、单位订购成本;订购策略  $(R, Q)$  中  $R$  表示再订购点(库存下降到该水平即发出订单),  $Q$  表示订货量。从表中的几组结果可看出,单位订购成本的变化对再订购点的选择有较大影响。

表 1 不同单位成本配置下的最优订购策略

Table 1 The best ordering strategy under different unit cost ratio		
单位成本配置 $c_1:c_2:c_3$	订购策略 $(R, Q)$	服务水平 $A$
1:10:10	(4, 4)	0.9368
1:10:20	(8, 3)	0.9749
1:10:30	(7, 4)	0.9904
1:10:40	(7, 4)	0.9904
1:10:50	(7, 4)	0.9904
1:10:60	(8, 4)	0.9945
1:20:10	(4, 4)	0.9368
1:30:10	(4, 4)	0.9368
1:40:10	(4, 4)	0.9368
1:50:10	(4, 4)	0.9368
1:60:10	(4, 4)	0.9368

4 结 论

本文从分析风电场备件订购的主要目的出发,明确了将维修策略与备件管理相结合来进行研究的思路。确立了与风电场实际相结合的维修策略模型,并引入役龄回复因子,使模型更准确。备件订购策略则以传统的  $(R, Q)$  订购策略为基础,运用离散事件仿真法,求解在维修策略影响下的备件成本模型。分析单位成本配置为 1:1 时的成本分布规律,同时给出几组不同单位成本配置下的最优订购策略。结果表明,单位订购成本的变化对再订购点的选择有较大影响。

模型的假设决定了模型必然会存在局限性,本文仅分析了订购策略对备件管理成本的影响,以及不同单位成本配置对最优备件订购策略选择的影响。仅将维修策略作为备件订购的输入,并未详细分析不同维修策略对总成本的影响。

[参考文献]

[1] 孙可斐. 基于维修策略的服务备件库存控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

[1] Sun Kewen. Research on inventory control of service spares based on maintenance strategy [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.

[2] 伍孟轩, 宋庭新, 张一鸣, 等. 风电场运行维护中的

- 库存管理控制策略[J]. 湖北工业大学学报, 2015, 30(2): 19—23.
- [2] Wu Mengxuan, Song Tingxin, Zhang Yiming, et al. Inventory management and control strategy for operation and maintenance of wind farm[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2015, 30(2): 19—23.
- [3] 齐二石, 张志春, 刘洪伟. 基于快速响应及成本控制的风场备件管控模型[J]. 系统工程, 2014, (8): 80—86.
- [3] Qi Ershi, Zhang Zhichun, Liu Hongwei. Study on control model of wind farm spare parts based on rapid response and cost control[J]. Systems Engineering, 2014, (8): 80—86.
- [4] Wang Yabin, Zhao Jianmin, Cheng Zhonghua. Integrated decision on spare parts ordering and equipment maintenance under condition based maintenance strategy[J]. Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability, 2015, 17(4): 591—599.
- [5] Wang L, Chu J, Mao W. A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 194(1): 184—205.
- [6] Van Horenbeek A, Buré J, Cattrysse D, et al. Joint maintenance and inventory optimization systems: A review[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 143(2): 499—508.
- [7] 卓明良, 潘尔顺, 廖雯竹, 等. 基于可靠度限制的周期性预防维护模型研究[J]. 工业工程与管理, 2009, 14(1): 62—65.
- [7] Zhuo Mingliang, Pan Ershun, Liao Wenzhu, et al. Study on periodic preventive maintenance model based on limitation of reliability[J]. Industrial Engineering and Management, 2009, 14(1): 62—65.
- [8] Guo H, Watson S, Tavner P, et al. Reliability analysis for wind turbines with incomplete failure data collected from after the date of initial installation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(6): 1057—1063.
- [9] Tian Z, Jin T, Wu B, et al. Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring[J]. Renewable Energy, 2011, 36(5): 1502—1509.
- [10] 赵洪山, 张路朋. 基于可靠度的风电机组预防性机会维修策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3777—3783.
- [10] Zhao Hongshan, Zhang Lupeng. Study on preventive opportunity maintenance of wind turbine based on reliability[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(22): 3777—3783.

## ANALYSIS OF SPARE PARTS COST FOR WIND FARM BASED ON PERIODIC PREVENTIVE MAINTENANCE

Zhang Zaifeng, Zhang Chen, Guo Sheng, Gao Wei, Huang Shuhong, Yang Tao

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the repairable component in wind farm, based on the periodic preventive maintenance strategy, the wind farm spare parts simulation model with continuous inspect  $(R, Q)$  inventory control policy was established, the influence of imperfect maintenance and random failure on the demand of spare parts was considered. The discrete event simulation was used to solve this model. The influence of different reorder point and order quantity on the spare parts cost and the service level was analyzed under a certain maintenance strategy. The best spare parts ordering policy under a few groups of different unit cost ratio was given and the result showed that the change of unit ordering cost has a great influence on the choice of the reorder point.

**Keywords:** wind farm; spare parts; periodic preventive maintenance; discrete event simulation