

DOI: 10.7667/PSPC161505

基于可靠度约束的风电机组机会检修模型

李培¹, 李宏博¹, 刘盟伟², 许敏敏¹

(1. 国网技术学院, 山东 济南 250000; 2. 鄂尔多斯电业局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 对风电机组进行预防性检修, 能够有效提高机组的可靠性。首先以风电机组单个部件的可靠度作为约束条件, 以单部件单位时间检修成本最小作为目标函数, 求得单部件的最佳检修周期和检修次数。在此基础上, 对符合一定条件的部件进行机会检修, 构建了风电机组的机会检修模型。最后, 以机会检修策略下总的检修费用最小作为目标函数, 以机组整体的可靠度作为约束条件, 利用遗传算法对该模型进行求解以得到最佳的机会检修阈值和最小的检修总费用。通过算例分析表明, 该机会检修模型能够有效节约总的检修成本。该研究对检修部门制定检修计划具有一定的参考意义。

关键词: 风电机组; 可靠度; 机会检修; 检修成本; 遗传算法

Opportunistic maintenance model for wind turbine based on reliability constraint

LI Pei¹, LI Hongbo¹, LIU Mengwei², XU Minmin¹

(1. State Grid of China Technology College, Jinan 250000, China; 2. Ordos Electric Power Bureau, Ordos 017000, China)

Abstract: Preventive maintenance of wind turbine can effectively improve the reliability of wind turbine. This paper firstly sets single component reliability of wind turbine as constraint condition, single component minimum unit time maintenance cost as objective function to obtain optimal maintenance cycle and maintenance times. On this basis, the components which meet certain conditions are repaired, then the opportunistic maintenance model of wind turbine is built. Lastly, it takes the minimum total cost under opportunistic maintenance as objective function and the wind turbine availability as constraint condition, and then solves this model to obtain optimal threshold of opportunistic maintenance and minimum total maintenance cost using genetic algorithm. The example analysis shows that the model can effectively save the total maintenance cost. This study has some reference significance for the maintenance department to make the maintenance plan.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 522727160002).

Key words: wind turbine; reliability; opportunistic maintenance; maintenance cost; genetic algorithm

0 引言

风能作为一种清洁的可再生能源, 其开发利用越来越受到各国的重视, 风电的装机容量也在逐年增加^[1-2]。作为风电系统的关键装备, 风电机组结构复杂并且常年运行于野外, 工作环境恶劣, 安装和检修都较为困难。为了使风电场具有较大的收益, 风电机组必须满足一定的可靠度, 以减少系统的停机损失。合理的检修计划不但能提高风电机组的可靠度, 而且能够有效降低风电机组的检修费用。

近年来, 风电机组的检修维护受到了企业和学

术界的高度关注。文献[3]重点关注风电机组叶片的检修维护, 以风力机叶片损伤程度及退化数据为基础, 通过仿真实现叶片检修策略的优化。文献[4]采用半马尔科夫模型研究了风电机组齿轮箱的检修决策。文献[5]采用系统失效模型与延迟检修模型, 研究了风电机组关键部件的检修优化问题。上述文献存在的问题在于只是针对风电机组的单个部件进行了检修优化, 这种以时间为基准的单部件预防性检修策略, 各部件的检修缺少配合和协调, 将会带来昂贵的检修费用和高额的停机损失^[6]。

风电机组由齿轮箱、主轴、发电机组和叶轮等关键部件组成, 是一个典型的多部件串联可修复系统。文献[7-8]指出, 多部件系统的部件之间存在检

修相关性,采用批量检修、成组检修和机会检修能够有效地降低检修费用。其中机会检修模型是由 Berg.M 提出的^[9],该模型定义系统中一个部件检修时,如果其他部件超过给定的阈值,则将其他部件一起进行检修和更换。文献[10]提出了风电机组基于可靠度的机会检修模型,该模型以机会检修可靠度为优化变量对总检修费用进行优化,以获得最小的检修费用。文献[11-12]提出了风电机组的状态-机会检修模型,该模型以系统的状态指示器为基础,在对机组某部件进行检修时,如果其他部件的状态指示器超过自身的机会检修阈值时,则对其进行机会检修。

本文在上述文献的基础上,提出了基于可靠性要求的风电机组机会检修模型。所做工作具体如下:首先,根据历史数据得到各部件的寿命分布函数,并且以各部件的可靠度作为约束条件,得到各部件最佳的检修周期和检修次数。其次,根据机会检修策略定义了各部件的机会检修阈值,并且求解了风电机组在机会检修策略下的总检修费用的表达式。最后,利用遗传算法对该模型进行优化,以得到最佳的机会检修阈值和最小的总检修费用,并且和单部件检修模型进行了对比,以验证所建立模型的有效性。

1 基于可靠度的风电机组机会检修策略

1.1 机会检修原理

本文对风电机组的检修方式主要考虑以下 4 种:非预期故障检修,采用最小检修方式,检修后不改变部件的故障率;预防检修和机会检修,采用不完全机会检修方式;部件更换,部件 k 在第 $N_k + 1$ 次预防性检修时被更换,更换使部件恢复如新。

风电机组是由齿轮箱、轴承、发电机和叶片等部件构成的系统,且机组各部件的可靠度函数是随时间单调下降的。基于可靠度的风电机组机会检修原理如下:当机组中某个部件的可靠度到达预防性检修可靠度时,对其进行预防性检修,此时可利用该机会对机组中其他部件提前进行检修,从而提高机组的可靠性,减少停机损失和检修成本。

1.2 机组各部件在机会检修策略下的配合关系

只有对符合一定条件的部件进行机会检修,才能够减少总的检修成本。机组各部件在时间轴的检修节点上进行协调和配合。具体地,假设 t 时刻对部件 l 进行预防性检修,此时判断是否对部件 k 进行检修的方法主要是比较 t 时刻部件 k 的可靠度 $R_k(t)$ 与其最低可靠度 R_{mk} 的差值 ΔR 是否大于可靠性机会维修阈值 ΔR_k ,配合关系如图 1 所示。

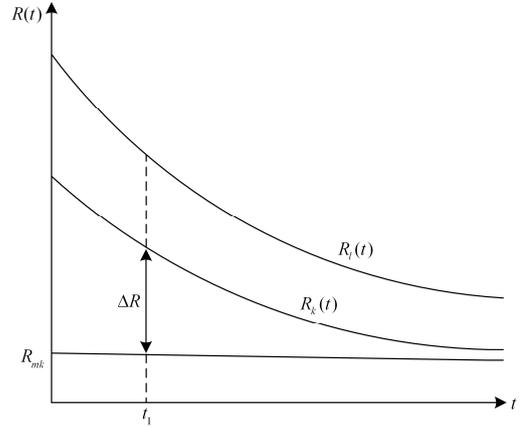


图 1 机会检修策略图

Fig. 1 Schematic diagram of opportunistic maintenance strategy

1) 当 $R_k(t) - R_{mk} = \Delta R > \Delta R_k$ 时,时刻 t 不需要对部件 k 进行机会检修。

2) 当 $R_k(t) - R_{mk} = \Delta R \leq \Delta R_k$ 时,时刻 t 需要对部件 k ($k \neq l$) 进行机会检修,如果此时部件 k 的检修次数达到 $N_k + 1$ 且 $R_k - R_{mk} < 0$, 则对其进行更换。

完成检修任务后,部件 l 、 k 进入其下一个检修间隔期,风电机组继续运行,直到又需要对某部件进行预防性检修,同样分析是否需要对其他部件进行机会检修,由此机组各部件之间进行协调和配合检修。本文根据上述策略对风电机组进行检修,通过寻找最佳的机会维修阈值 $\Delta R = (\Delta R_1^*, \Delta R_2^*, \dots, \Delta R_k^*)$, 使风电机组总的检修费用最低。

2 单部件故障率及检修间隔期的确定

2.1 部件故障率分布函数

对部件进行预防性检修是提高其可靠性的有效途径。在单部件检修策略研究中,预防性检修具有以下两个特点:1) 不能使设备修复如新,即为非完全维护;2) 随着检修次数及部件役龄的增加,部件的故障率的变化率呈现逐渐增大的趋势,从而检修周期内出现的故障次数逐步地增加。文献[11]引入役龄递减因子和故障率递增因子来描述上述特点。本文对役龄递减因子和故障率递增因子的特点进行综合考虑,建立了基于可靠性的单部件不完全检修模型,部件 k 第 i 次预防性检修前后其故障率函数之间的关系^[12]为

$$\lambda_{(i+1)k}(t) = b_{ik} \lambda_{ik}(t + a_{ik} T_{ik}) \quad t \in (0, T_{(i+1)k}) \quad (1)$$

式中: i 为预防性维修周期数 $i=1, 2, \dots, N$; T_{ik} 表示部件 k 第 $i-1$ 次和第 i 次预防性维修的间隔周期; $\lambda_{(i+1)k}(t)$ 为部件 k 第 $i-1$ 和第 i 次预防性检修的间隔

周期; $0 < a_{ik} < 1$ 为部件 k 的役龄递减因子; $b_{ik} > 1$ 为其故障率递增因子; a_{ik} 和 b_{ik} 可以利用部件的历史检修数据求得; $\lambda_1(t)$ 为部件全新的故障率分布函数, 它通常由部件的自身特点和实际运行环境决定。

2.2 单部件检修间隔期的优化

风力发电机组对部件的可靠度有严格的要求, 当部件可靠度低于一定限度时, 风力发电机组的运行将存在较大的风险, 所以事先应为风力发电机组的每个关键部件设定一个预防性检修的可靠度阈值 R_{mk} , 当部件 k 的可靠度低于 R_{mk} 时, 则对其进行检修。由此可得部件 k 的可靠度方程为

$$\exp\left[-\int_0^{T_{1k}} \lambda_{1k}(t)dt\right] = \exp\left[-\int_0^{T_{2k}} \lambda_{2k}(t)dt\right] = \dots = \exp\left[-\int_0^{T_{nk}} \lambda_{nk}(t)dt\right] = R_{mk} \quad (2)$$

式(2)可变形为

$$\int_0^{T_{1k}} \lambda_{1k}(t)dt = \int_0^{T_{2k}} \lambda_{2k}(t)dt = \dots = \int_0^{T_{nk}} \lambda_{nk}(t)dt = -\ln R_{mk} \quad (3)$$

式中, $\int_0^{T_{ik}} \lambda_{ik}(t)dt$ 表示第 i 个检修间隔期的累积故障风险, 则在每个预防性检修周期中, 部件 k 进行故障检修的次数为 $-\ln R_{mk}$ 。由式(3)即可确定部件 k 每次预防性检修的时间间隔 T_{ik} 。

假定部件 k 在第 $N+1$ 次预防性检修时被更换, 则部件 k 单位时间的检修成本为

$$C_{Ek} = \frac{N[C_{pk} + C_{fk}(-\ln R_{km})] + C_{dk}(t_{pk} + t_{fk}(-\ln R_{km})) + C_r}{\sum_{i=1}^N [T_{ik} + t_{pk} + t_{fk}(-\ln R_{km})]} \quad (4)$$

式中: C_{pk} 表示对部件 k 进行一次预防性检修的费用; C_{fk} 表示部件 k 进行一次非预期故障检修所需的费用; C_{dk} 表示部件 k 故障后单位时间的停机损失; C_r 表示部件 k 的更换费用; t_{pk} 表示对部件 k 进行一次预防性检修所需时间; t_{fk} 表示对部件 k 进行一次非预期故障检修所需时间。

3 风电机组机会检修模型

3.1 模型假设

为了简化模型和方便主要问题的研究, 在构建模型时首先做如下假设:

- 1) 风电机组的各部件在初始时刻均为全新状态, 各部件的故障分布相互独立, 且均服从威布尔分布。
- 2) 风电机组发生非预期故障时, 立刻对其进行最小检修且检修时间不可忽略。
- 3) 风电机组连续工作, 单个部件的故障会引起

整个机组的停机。

3.2 风电机组机会检修费用分析

风电机组的检修费用由两部分组成, 一部分为机组的直接检修费用; 另一部分为由于检修而产生的停机损失费用。机组中任意部件 k 的直接检修费用又可以分为预防性检修费用 C_{pk} 、部件的更换费用 C_{rk} 以及部件非预期故障检修费用 C_{fk} 。风电机组的停机损失费用包括预防检修停机损失费用 C_{pd} 和非预期故障检修停机损失 C_{rid} 。风电机组任何一个部件故障, 都会造成整个机组的停机, 用 C_d 表示机组单位时间的停机损失费用, 下面分别对上述检修费用进行分析。

1) 直接检修费用

风电机组从时刻 t_{n-1} 完成第 $n-1$ 次预防检修后到时刻 t_n 完成第 n 次预防检修后, 期间部件 k 的直接检修费用为

$$C_{p(k,n)} = \begin{cases} C_{fk} \int_0^{(t_n - t_{n-1})} \lambda_{nk}(t)dt & Y(k, t_n) = 0 \\ C_{pk} + C_{fk} \int_0^{(t_n - t_{n-1})} \lambda_{nk}(t)dt & Y(k, t_n) = 1 \\ C_{rk} + C_{fk} \int_0^{(t_n - t_{n-1})} \lambda_{nk}(t)dt & Y(k, t_n) = 2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $Y(k, t_n)$ 表示部件 k 在风电机组检修时刻 t_n 所采取的检修方式, $Y(k, t_n) = 0$ 表示不对部件 k 进行任何检修, $Y(k, t_n) = 1$ 表示对部件 k 进行预防性检修, $Y(k, t_n) = 2$ 表示部件进行预防性更换。

如果风电机组在有限运行周期 $[0, T]$ 内共进行了 N 次预防性检修, 则部件 k 在周期内的直接检修成本为

$$C_k = \sum_{n=1}^N C_{p(k,n)} \quad (6)$$

设风电机组由 S 个部件组成, 则所有部件在 $[0, T]$ 的直接检修成本为

$$C_m = \sum_{k=1}^S \sum_{n=1}^N C_{p(k,n)} \quad (7)$$

2) 预防性检修停机损失费用

风电机组的预防性检修停机损失费用 C_{pd} 与停机时间 T_{pd} 成正比关系, 而 T_{pd} 与每次进行预防性检修的任务量有关, 当风电机组进行第 n 次预防性检修时, 应选择检修中所需时间最长的部件作为停机时间, 即有

$$T_{pdn} = \max_{1 \leq k \leq S} (t_{pkn}, t_{rkn}) \quad (8)$$

式中: S 为机组的部件数; t_{pkn} 表示部件 k 在 t_n 时刻

进行预防性检修所需时间; t_{rkt_n} 表示部件 k 在 t_n 时刻进行更换所需时间。则风电机组在有限周期 $[0, T]$ 内预防性检修停机损失费用为

$$C_{pd} = C_d T_{pd} = C_d \sum_{n=1}^N T_{pdn} \quad (9)$$

式中, C_d 表示风电机组单位时间的停机损失费用。

3) 非预期故障检修停机损失费用

对于部件 k 在有限周期 $[0, T]$ 内发生非预期故障造成的停机时间为

$$T_{fdk} = \tau_{fk} \sum_{n=1}^N \int_0^{(t_n - t_{n-1})} \lambda_{nk}(t) dt \quad (10)$$

式中: τ_{fk} 表示每次非预期故障的平均停机时间; N 为风电机组在有限周期内的预防性检修的次数。则风电机组在有限运行周期内非预期故障造成的停机损失费用为

$$C_{fd} = C_d T_{fd} = C_d \sum_{k=1}^S T_{fdk} = C_d \tau_{fk} \sum_{k=1}^S \sum_{n=1}^N \int_0^{(t_n - t_{n-1})} \lambda_{nk}(t) dt \quad (11)$$

风电机组在有限周期 $[0, T]$ 内的总检修费用为各部件的直接检修费用和机组的停机损失费用之和, 即为

$$C = C_m + C_{pd} + C_{fd} = \sum_{k=1}^S \sum_{n=1}^N C_{p(k,n)} + C_d \sum_{n=1}^N T_{pdn} + C_d \tau_{fk} \sum_{k=1}^S \sum_{n=1}^N \int_0^{(t_n - t_{n-1})} \lambda_{nk}(t) dt \quad (12)$$

3.3 风电机组整体的可靠度分析

风电机组整体的可靠度可以用一段时间内机组正常工作的时间占总时间的百分比来表示。根据风电场的运行数据, 年有效运行 2000 h 是单台风电机组的盈亏平衡点, 所以为收回成本, 风电机组必须保证一定的可靠度。采用机会检修策略后, 风电机组的可靠度可以表示为

$$A = \frac{U}{U + D} = 1 - \frac{D}{U + D} = 1 - \frac{T_{pd} + T_{fd}}{T} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N T_{pdn} + \tau_{fk} \sum_{k=1}^S \sum_{n=1}^N \int_0^{(t_n - t_{n-1})} \lambda_{nk}(t) dt}{T} \quad (13)$$

式中: U 表示机组正常运行的时间; D 表示机组的停机时间。

风电机组的最低可靠度 A_0 可以根据风电机组的盈亏平衡点确定。本文建立的机会检修模型的目标函数为使总的检修费用最小, 约束条件为机组的可靠度以及机会检修阈值, 具体模型如式(14)所示。

$$\begin{cases} \min C = \sum_{k=1}^S \sum_{n=1}^N C_{p(k,n)} + C_d \sum_{n=1}^N T_{pdn} + \\ C_d \tau_{fk} \sum_{k=1}^S \sum_{n=1}^N \int_0^{(t_n - t_{n-1})} \lambda_{nk}(t) dt \\ \text{s.t. } A = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N T_{pdn} + \tau_{fk} \sum_{k=1}^S \sum_{n=1}^N \int_0^{(t_n - t_{n-1})} \lambda_{nk}(t) dt}{T} \geq A_0 \\ 0 \leq \Delta R \leq \min_{1 \leq k \leq S} (1 - R_{mk}) \end{cases} \quad (14)$$

3.4 机会检修模型求解

机会检修模型具体求解步骤如下所述。

1) 对风电机组的历史运行数据进行统计分析可以得到各部件的形状参数 β_k 、尺度参数 η_k 、更换费用 C_{rk} 、预防性检修费用 C_{pk} 、非预期故障检修费用 C_{fk} 、进行一次预防性检修所需时间 t_{pk} 、进行一次非预期故障检修所需时间 t_{fk} 以及部件 k 每次完成预防性检修后的故障率函数 $\lambda_{(i+1)k}(t) = b_{ik}(t + a_{ik} T_{ik})$ 。

2) 根据第 2 节中的方法得到部件 k 的最优检修间隔周期 T_{ik} 以及最佳的预防性检修次数 N_k 。

3) 记 $t_n = \min(t_{(1,n)}, t_{(2,n)}, \dots, t_{(k,n)}, \dots, t_{(s,n)})$ 作为机组第 n 次检修的时刻, 其中 $t_{(k,n)}$ 表示部件 k 第 n 次检修的时刻。

4) 设定机组的机会检修阈值 ΔR_k 。比较 $R_{kn} - R_{km}$ 与 ΔR_k 的大小。如果 $R_{kn} - R_{km} > \Delta R_k$, 则在时刻 t_n 部件 k 不需要进行机会检修; 如果 $0 < R_{kn} - R_{km} \leq \Delta R_k$, 则在时刻 t_n 部件 k 需要进行机会检修, 同时部件 k 的预防性检修次数变为 $n_k + 1$; 如果 $0 < R_{kn} - R_{km} \leq \Delta R_k$ 且 $n_k = N_k + 1$, 令 $n_k = 0$ 并且对部件 k 进行预防性更换。

5) t_n 时刻对部件 k 进行检修所需时间可以表示为

$$\tau(k, n_k) = \begin{cases} 0 & Y(k, t_n) = 0 \\ t_{pkt_n} & Y(k, t_n) = 1 \\ t_{rkt_n} & Y(k, t_n) = 2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: t_{pkt_n} 表示对部件 k 进行一次预防性检修所需时间; t_{rkt_n} 表示对部件 k 进行一次预防性更换所需时间。选择检修所需时间最长的部件的检修时间, 作为此次检修的机组停机时间, 即 $T_{pdn} = \max_{1 \leq k \leq S} (\tau(k, n_k))$ 。

6) 根据式(5)计算从时刻 t_{n-1} 完成第 $n-1$ 次预防性检修到时刻 t_n 完成第 n 次预防性检修后, 期间部

件 k 的直接检修费用; 根据式(6)可求得机组的直接检修费用; 根据式(9)可求得机组的预防性检修停机损失费用; 根据式(11)可求得风电机组的非预期故障停机损失费用。

7) 风电机组第 n 次预防性检修后部件 k 下次预防性检修的时刻可以表示为

$$t_{(k,(n+1))} = \begin{cases} t_{(k,n)} + T_{\text{pdn}} & Y(k, t_n) = 0 \\ t_n + T_{\text{pdn}} + T_{(n+1)k} & Y(k, t_n) = 1, 2 \end{cases} \quad (16)$$

8) 根据步骤 3) 方法计算出机组第 $n+1$ 次检修的时间点 t_{n+1} 。对步骤 4)–7) 不断进行重复, 直到 $t_n = N+1 > T$, T 表示风电机组的有限运行周期。根据式(12)可计算出风电机组总的检修费用, 根据式(13)计算出机组的可靠度。

9) 本文所建立的模型为一个多变量和非线性的全局寻优问题, 可调用 Matlab 遗传工具箱对该模型进行求解。遗传算法^[13-14]的具体流程如下所述。

步骤 1: 利用计算机随机地形成若干个初始个体构成种群 $P_0 = (\overline{\Delta R(1)}, \overline{\Delta R(2)}, \dots, \overline{\Delta R(n)})$, 其中 $\overline{\Delta R(n)}$ 表示模型的一个可行解。

步骤 2: 计算出每个个体的 C 和 A 的值, 对不

满足可靠度要求的个体进行淘汰。 C 的值越小表示个体的适应度越高, 按照 C 值的升序对淘汰后的个体进行排序。

步骤 3: 对排序后的种群进行选择操作。将适应度最高的个体保留至下一代, 淘汰适应度最低的个体, 对余下的个体依照赌轮算法进行选择。

步骤 4: 按照设定的交叉概率 P_n 和变异概率 P_m 对种群进行交叉和变异操作, 产生新一代种群, 并且返回到步骤 2。

步骤 5: 当种群迭代够预定的迭代次数后终止计算, 输出最优的 $\overline{\Delta R}$ 。

4 算例分析

4.1 模型参数的确定

为验证本文所建模型的合理性。任选一台风电机组, 对齿轮箱、主轴承、发电机和叶轮 4 个关键部件进行机会检修策略分析。通过对大型风电场故障数据进行统计分析可得知 4 个关键部件的故障时间均服从威布尔分布, 各部件的威布尔分布参数以及其他参数如表 1 所示。令各部件的役龄递减因子和故障率递增相同, 即有 $a_k = a = 0.1$, $b_k = b = 1.1$ 。风电机组的检修研究周期取为 $[0, 365]$ 天。

表 1 风电机组关键部件检修参数

Table 1 Maintenance parameters of critical components of wind turbine

部件编号	β	η	$C_{\text{pk}}/\text{万元}$	$C_{\text{rk}}/\text{万元}$	$C_{\text{t}}/\text{万元}$	$t_{\text{p}}/\text{天}$	$t_{\text{rk}}/\text{天}$	$t_{\text{tk}}/\text{天}$
1	9.1604	1207.9	3.8	6.6	16.7	2	4	2
2	7.3317	1189.1	1.5	3.1	15.6	2	3	2
3	12.3972	1204.6	2.5	5.6	19.4	4	5	4
4	10.5149	1134.8	2.8	4.8	12.5	4	6	3

在 JB/T10396 中给出了以上 4 个关键部件无故障运行的可靠度要求, 如表 2 所示, 当风电机组的关键部件的可靠度低于表 2 所示数据时, 进行预防性检修。

表 2 风电机组关键部件的预防性定时检修可靠度要求

Table 2 Preventative maintenance reliability requirements of critical components of wind turbine

部件	齿轮箱	主轴承	发电机	叶轮
可靠度	0.95	0.94	0.95	0.96

4.2 单部件预防检修间隔期和检修次数的求解

将第 4.1 小节中的参数代入第 2 小节的模型中, 运用 Matlab 软件编程对该模型进行求解。表 3 为各部件的单位时间的检修成本随检修次数的变化表, 表中各部件单位时间的检修费用只计算到 $N_k + 1$ 次为止。

表 3 各部件单位时间检修成本与检修次数的变化关系

Table 3 Relation of each component unit time maintenance cost versus maintenance times

部件	各部件单位时间的检修成本/(元/天)					最优预防 维修次数
	1	2	3	4	5	
1	212.3	206.8	197.6	216.5	—	3
2	223.8	207.1	201.2	197.4	204.6	4
3	478.5	465.2	482.8	—	—	2
4	115.7	104.8	102.9	112.3	—	3

从表 3 可以看出单部件的单位时间的检修费用随检修次数的增加呈现先下降后上升的趋势, 故存在最佳的检修次数使单部件单位时间的检修成本最小。表 4 列出了在其生命周期内最佳的预防检修周期。从表 4 可以看出各部件的预防性检修周期是逐渐缩短的, 这与实际情况相符合, 即随着部件役龄的增加应该对部件进行更加频繁的检修, 以确保其

可靠性。

表 4 单部件最优检修间隔期

Table 4 Single component optimal maintenance interval

部件	各部件检修周期 /天				
	T_{1k}	T_{2k}	T_{3k}	T_{4k}	T_{5k}
1	120.1	114.5	106.5	98.7	—
2	95.4	76.2	70.8	67.6	55.4
3	165.4	154.2	123.6	—	—
4	89.7	78.4	72.5	68.9	—

4.3 风电机组机会检修模型求解

调用 Matlab 中的 GA 工具箱,对风电机组按照机会检修模型求解。初始种群规模设定为 300,最大的迭代次数 $d=100$,交叉概率 $P_m=0.8$,变异概率 $P_n=0.02$,变量精度为 0.01,其他参数采用系统默认值,经过 100 次迭代后可求得最优的总检修费用为 25.4 万元,与其对应的一组最优的机会检修阈值为 $\Delta R=(0.198, 0.124, 0.167, 0.114)$ 。

4.4 机组机会检修模型与现有检修模型对比分析

现有风电机组的检修模型多为单部件检修模型,该模型不考虑机会检修策略,根据表 3 和表 4 求出的单部件最优预防检修策略对机组进行单独检修,在有限周期 $[0, 365]$ 天内风电机组总的检修费用为 36.5 万元。表 5 为不同检修模型下各项检修费用的对比。

表 5 不同检修模型下各项检修费用对比

Table 5 Comparison of various maintenance costs under different maintenance model

	现有检修模型	机会检修模型
预防性检修次数	16	7
总检修成本/万元	36.5	25.4
直接检修成本/万元	14.3	17.1
预防性检修停机损失/万元	12.4	5.8
故障检修停机损失/万元	9.8	2.5

从表 5 可以看出,机会检修模型比现有检修模型节约了约 30.41% 的检修费用,并且其检修次数减少了约一半。由于机会检修提前对部件进行了成组检修,故其直接检修费用增加了 2.8 万元,但是由于减少了机组的预防性检修次数,并且对部件提前进行机会检修,减少了机组的故障次数,相应的预防性检修停机损失减少了 6.6 万元,故障停机损失减少了 7.3 万元,这是风电机组总检修费用减少的主要原因。

5 结论

本文从风电机组运行可靠性和经济性的角度出

发,构建了风电机组的机会检修模型,并且运用遗传算法对该模型进行了求解,以得到最佳的机会检修阈值和最小的检修总费用。在此基础上,和没有考虑机会检修的单部件检修模型进行了对比,结果表明,机会检修模型比单部件检修模型节省了约 1/3 的检修总费用。所建模型为风电机组的检修维护提供了新的思路,具有一定的应用前景。需要指出的是,本文旨在机会检修模型的建立和求解,在基础数据的积累方面还比较缺乏,若要将模型运用于实际检修计划的制定,还需要大量基础数据的积累。

参考文献

- [1] 张颖超,郭晓杰,叶小岭,等.一种短期风电功率集成预测方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(7):90-95. ZHANG Yingchao, GUO Xiaojie, YE Xiaoling, et al. An integrated forecasting method of short-term wind power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 90-95.
- [2] 廖志刚,何世恩,董新洲,等.提高大规模风电接纳及送出的系统保护研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(22):41-46. LIAO Zhigang, HE Shien, DONG Xinzhou, et al. Research on the system protection for enhancing the accommodation and transmission of large scale wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 41-46.
- [3] BESNARD F, BERTLING F. An approach for condition-based maintenance optimization applied to wind turbine blades[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(2): 77-83.
- [4] 苏春,周小荃.基于半马尔科夫决策过程的风力机状态维修优化[J].机械工程学报,2012,48(2):44-49. SU Chun, ZHOU Xiaoquan. Condition-based maintenance optimization for wind turbines based on semi-Markov decision process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 44-49.
- [5] NIELSEN J J, SORENSEN J D. On risk-baesd operation and maintenance of offshore wind turbine components[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96(1): 218-229.
- [6] 肖运启,王昆朋,贺贯举,等.基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2132-2139. XIAO Yunqi, WANG Kunpeng, HE Guanju, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for operation condition of large-scale wind turbines based on trend predication[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2132-2139.
- [7] WANG Hongzhou. A survey of maintenance policies of

- deteriorating systems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 139(3): 469-489.
- [8] HORENBEEK A V, PINTELON L. A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 120(1): 39-50.
- [9] NICOLAI R P, DEKKER R. Optimal maintenance of multi-component systems: a review[R]. Rotterdam: Econometric Institute Report, 2008.
- [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(5): 3777-3783.
ZHAO Hongshan, ZHANG Lupeng. Reliability preventive opportunistic maintenance strategy for wind turbines based on reliability[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(5): 3777-3783.
- [11] 赵洪山, 张健平, 高夺, 等. 风电机组的状态-机会维修策略[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(15): 3851-3858.
ZHAO Hongshan, ZHANG Jianping, GAO Duo, et al. A condition based opportunistic maintenance strategy for wind turbine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(15): 3851-3858.
- [12] 赵洪山, 张健平, 程亮亮, 等. 考虑不完全维修的风电机组状态-机会维修策略[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(3): 701-706.
ZHAO Hongshan, ZHANG Jianping, CHENG Liangliang, et al. A condition based opportunistic maintenance strategy for wind turbine under imperfect maintenance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 701-706.
- [13] 徐岩, 鄧静. 基于改进自适应遗传算法的PMU优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(2): 55-62.
XU Yan, ZHI Jing. Optimal configuration based on improved adaptive genetic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(2): 55-62.
- [14] 颜晓娟, 龚仁喜, 张千锋. 优化遗传算法寻优的SVM在短期风速预测中的应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(9): 38-42.
YAN Xiaojuan, GONG Renxi, ZHANG Qianfeng. Application of optimization SVM based on improved genetic algorithm in short-term wind speed prediction[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(9): 38-42.

收稿日期: 2016-09-12; 修回日期: 2016-11-19

作者简介:

李 培(1985—), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为变电一次设备检修;

李宏博(1984—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电气设备高压试验; E-mail: dianli_gongcheng@163.com

刘盟伟(1985—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 葛艳娜)