

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231100

计及劣化状态和随机故障的光伏发电系统视情维修模型 以及最优检修策略

陈伟, 孙存育, 裴婷婷, 李明

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对现有光伏发电系统维修策略研究中通常仅考虑劣化状态导致维修决策不合理等问题, 提出了一种计及劣化状态和随机故障的光伏发电系统视情维修模型及最优检修策略。首先, 以离散状态下的 Markov 过程为基础, 将随机故障对维修策略的影响引入到光伏发电系统视情维修建模中, 建立光伏发电系统计及劣化状态和随机故障状态的视情维修模型, 定期检测光伏发电系统的状态。当系统状态超过预防性维修阈值时进行不完全维修; 出现随机故障时进行最小维修; 达到故障状态时进行更换。然后, 以光伏发电系统长期稳定运行的最小总成本率为目标, 采用一种改进的黏菌优化算法求取光伏发电系统最佳检测周期和预防性维修阈值。最后, 以某光伏发电系统为例, 通过对模型参数的灵敏度分析和传统不考虑随机故障维修模型的对比研究, 验证了所提模型及策略的有效性和可行性。

关键词: 光伏发电系统; 视情维修; Markov 过程; 随机故障; 预防性维修阈值

Condition-based maintenance model and optimal maintenance strategy of a photovoltaic power generation system considering deterioration state and random failure

CHEN Wei, SUN Cunyu, PEI Tingting, LI Ming

(College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: There are problems in existing PV power generation system maintenance strategy research, since it usually only considers the deterioration state and leads to unreasonable maintenance decisions. Thus this paper proposes a PV power generation system visual maintenance model and optimal overhaul strategy that takes into account the deterioration state and random faults. First, based on the Markov process in the discrete state, the influence of random faults on the maintenance strategy is introduced into the PV power generation system visual maintenance modeling. Then a visual maintenance model of the system taking into account the deterioration state and random fault state is established, the state of the system is detected periodically. Incomplete maintenance is carried out when the state of the system is more than the threshold value of the preventive maintenance; the minimum maintenance is carried out when there is a random fault; and replacement is carried out when it reaches the fault state. Then, an improved viscous bacteria optimization algorithm is used to find the optimal detection period and preventive maintenance threshold of the PV power generation system with the objective of the minimum total cost rate of the system for long-term stable operation. Finally, taking a PV power generation system as an example, the effectiveness and feasibility of the proposed model and strategy are verified through sensitivity analysis of the model parameters and a comparative study of the traditional maintenance model without considering the random faults.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51767017 and No. 51867015).

Key words: photovoltaic power generation system; condition-based maintenance; Markov process; random failure; preventive maintenance threshold

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51767017, 51867015); 甘肃省基础研究创新群体项目资助 (18JR3RA133); 甘肃省自然科学基金项目资助 (21JR7RA258)

0 引言

随着光伏发电快速发展,对光伏发电系统精细化运维也提出了更高的要求^[1],传统的事后维修及基于人工经验的检修策略已不能满足光伏发电系统运行可靠性和经济性的要求。因此,研究制定合理有效的光伏电站运维策略,对保障光伏电站经济、稳定、安全运行具有重要意义。

目前,根据光伏发电系统各部件组成结构的差异,维修策略可以分为单部件的事后维修和预防性维修策略以及多部件的机会维修策略。其中事后维修是指在设备故障发生后进行维修,其容易造成部件“欠维修”,严重影响整个系统的运行可靠性^[1]。预防性维修可以进一步划分为定期维修^[2-3]、以可靠度为中心的维修^[4-7]和状态维修^[8-10]。在光伏发电系统单部件预防性维修策略方面,文献[11]提出了一种光伏系统中光伏组件的预防性维护策略,以总体运行费用最小为目标确定最优维修周期及光伏板更换数量。文献[12]针对不同场景下的分布式光伏电站,通过蒙特卡洛模拟计算不同运维周期下总运维成本的概率分布,确定了各电站的最优运维周期。文献[13]以维护时间和准备时间为优化参数,以运维成本最低为目标建立光伏智能运维系统,通过粒子群优化算法进行求解。文献[14]从经济性和可靠性两方面,提出了预防性周期检修策略。文献[15]对设备建立了定期检修、状态检修马尔科夫模型,得出状态检修可提高设备可用度的结论。

在制定光伏发电系统多部件维修策略时,部分学者综合考虑了部件之间的经济相关性^[16]、结构相关性^[17]和故障相关性^[18]进行了联合机会维修,以降低整个系统的维修费用。文献[19]以可靠性为约束,通过马尔科夫链在元件级对每个元件状态预测,确定元件的最优维修时间,在系统级根据元件间费用相关性和结构相关性确定了元件共同机会维修区间,从而进行机会维修。文献[20]计及部件之间的关联性,通过马尔科夫链预测部件状态,提出了一种动态组合维修策略。文献[21]在考虑部件间经济相关性和结构相关性的基础上,提出了多部件串联系统动态成组机会维修策略。文献[22]考虑部件之间的退化相关性,将系统连续退化过程离散化为有限个状态空间,建立了以系统可用度最大为目标的维修决策优化模型。以上文献通常假设光伏发电系统的各部件状态可以实时监测到,实际上只有极少数电站能够实时监测所有部件的真实状态,并且监测成本较高。与实时监测相比,定期检查更具成本效益。光伏系统的维护通常采用定期检测,包括对

光伏系统的阵列进行目视检查和采用电气测量,如光伏组件的“ $I-V$ ”曲线和光伏阵列的开路电压短路电流的测量等。综上所述,光伏发电系统状态需定期检测以进行预防性维修,此时需确定最优检测周期和预防性维修阈值。然而,目前检测周期和预防性维修阈值主要通过人工经验得出,存在检修间隔不合理等情况。此外,对于光伏发电系统,现有运维策略大多也没有综合考虑阵列劣化和随机故障对系统带来的影响。

针对上述问题,本文在考虑劣化状态的基础上,将随机故障对维修策略的影响引入到光伏发电系统视情维修建模中,建立了一种计及劣化状态和随机故障的光伏发电系统视情维修模型,并在此基础上以长期稳定运行下总成本率最小为目标确定了光伏发电系统最优检修策略。首先,该方法以Markov过程为基础,建立光伏阵列连续劣化状态和随机故障状态的视情维修模型,依据光伏阵列规模大小确定各状态之间的转移速率,通过对模型递推求解,得到系统各状态稳态可用度。然后,在此基础上,根据更新报酬理论,推导光伏发电系统长期运行总成本率的表达式。最后,利用改进的黏菌寻优算法对模型进行优化,求得光伏发电系统最佳检测周期和预防性维修阈值,并且与未考虑随机故障的维修模型进行对比分析,以验证所建模型的有效性。

1 光伏发电系统故障分析及视情维修模型

1.1 光伏发电系统主要结构及故障研究

光伏发电系统结构复杂,它主要由光伏阵列、汇流箱、逆变器、逆变器等部件组成,其系统结构如图1所示。光伏阵列作为光伏发电系统中最为核心的部件,其成本占总成本的60%左右,其维护策略是光伏发电系统维护的重要依据。光伏发电系统通常安装在空旷的屋顶或者沙漠等地,由于运行环境较为恶劣,随着光伏发电系统运行时间的增加,光伏组件性能将会逐渐退化,组件也会出现分层、腐蚀和内部缺陷等故障,从而严重影响整个系统的运行。

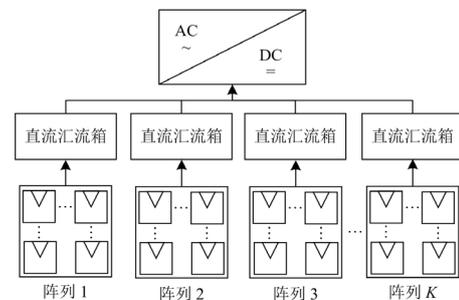


图1 光伏发电系统结构图

Fig. 1 Structure of photovoltaic power generation system

在整个光伏阵列中，除了组件劣化影响光伏系统性能外，由于过电压、过电流、极端温度、接地不良等因素导致阵列中的连接器、二极管、保险丝等主要部件出现随机故障，也会影响光伏阵列运行状态。光伏阵列的部件连接如图 2 所示。据统计，光伏阵列中除光伏组件外最常发生故障的部件是连接器、二极管和保险丝，三者的故障率占比分别为 13%、13%、35%^[23]。若在检测和维修过程中不考虑随机故障带来的影响，将会严重危害整个光伏发电系统运行的可靠性和安全性，因此在阵列运行过程中部件的随机故障也是不可忽略的。

1.2 视情维修模型的建立

本文基于 Markov 过程建立了光伏阵列的视情维护模型，该模型考虑了光伏阵列退化和随机故障。将连接器、保险丝、旁路二极管导致的故障建模为随机故障，将光伏阵列随时间退化建模为阵列退化状态转移过程。定期对光伏阵列退化状态和随机故障

进行检测，当检测到随机故障时采取最小维修的维修策略，当阵列劣化状态超过预防性维修阈值 N 时，对阵列进行预防性维修，考虑到维护并不一定使得阵列完全恢复，将不完全维修模型与视情维修理论相结合，建立了光伏阵列的预防性维护模型。阵列故障后更换阵列使阵列恢复至全新状态。光伏发电系统视情维修模型如图 3 所示。

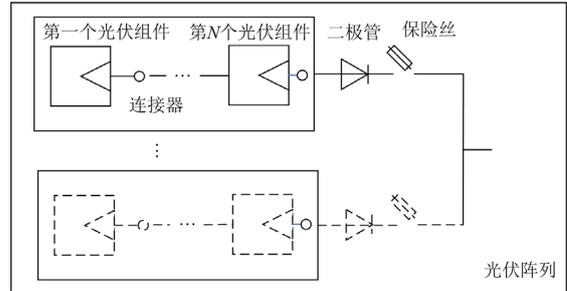


图 2 光伏阵列部件连接图

Fig. 2 Connection diagram of photovoltaic array components

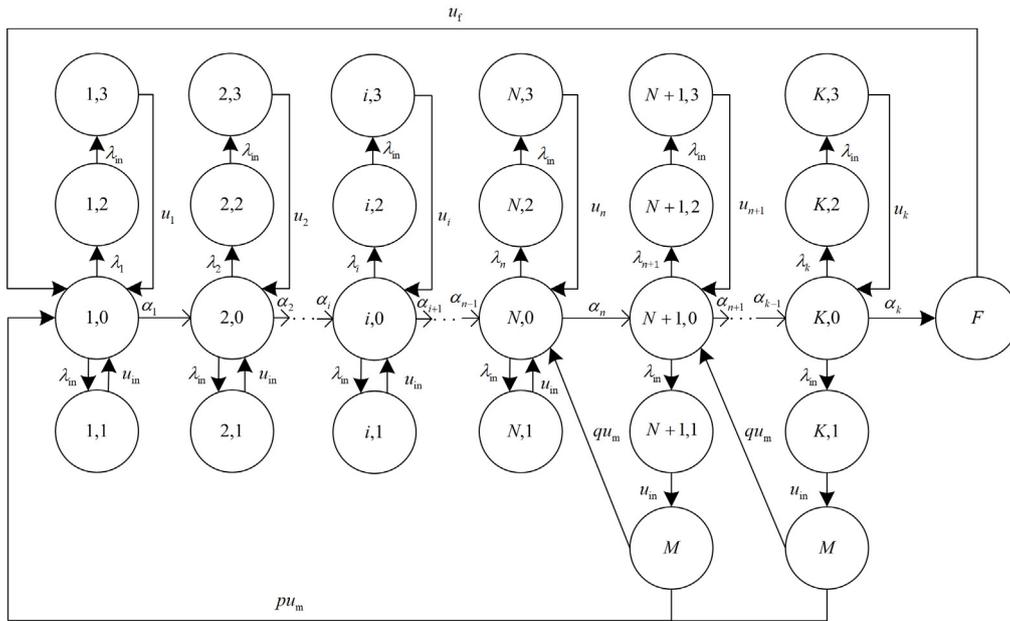


图 3 光伏发电系统视情维修模型

Fig. 3 Dependent maintenance model for photovoltaic power generation system

1.2.1 模型假设

1) 光伏阵列的性能随着工作时间的持续逐渐劣化，该过程分为 K 个性能劣化阶段。相邻劣化状态转移速率服从参数为 α_i 的指数分布，在第 K 个性能劣化阶段之后阵列发生故障，故障后更换阵列，使其修复如新。

2) 定期对光伏阵列退化状态进行检测，平均检测间隔为 $1/\lambda_m$ ， λ_m 为检测频率；平均检测时间为

$1/u_{in}$ ， u_{in} 为检测状态到劣化状态的转移速率，两者均服从指数分布。

3) 对光伏阵列状态 i 检测后的维修决策为：若 $0 \leq i < N+1$ ，则继续工作；若 $N+1 \leq i \leq K$ ，则进行预防性维修，平均预防性维修时间为 $1/u_m$ ， $K < i$ 即达到故障状态 F 时立即进行故障后更换，平均故障后更换时间为 $1/u_f$ 。其中： u_m 为预防性维修状态到劣化状态的转移速率； u_f 为故障状态到初

始状态的修复率。

4) 预防性维修为不完全维修, 以概率 p 使系统状态恢复如新, 以概率 $q = 1 - p$ 使系统恢复至前一状态。

5) 光伏阵列在状态 i 时发生随机故障的故障率为 λ_i , 对随机故障进行定期检测, 检测间隔为 $1/\lambda_m$, 发生随机故障时进行最小维修, 最小维修的修复率为 u_i , 平均修复时间为 $1/u_i$, 使阵列恢复至故障前状态。

6) 检测可准确反映光伏阵列运行状态。

7) 优化目标是长期稳定运行下总成本率最低。期望优化结果是最佳的检测频率 λ_m 和最佳的预防性维修阈值 N 。

1.2.2 模型描述

$\pi(i, 0)$ 表示阵列处于工作状态, $i = 1$ 表示光伏阵列处于全新状态, 当阵列状态在预防性维修阈值 N 之前时, 表示阵列正常运行, 当阵列状态超过预防性维修阈值 N 时表示阵列处于潜在故障状态, 对其进行预防性维修; $\pi(i, 1)$ 表示部件的第 i 个性能劣化阶段处于检测状态; $\pi(i, 2)$ 表示部件的第 i 个性能劣化阶段出现随机故障, 对部件进行最小维修, 使其恢复到故障前状态; $\pi(i, 3)$ 表示部件的第 i 个随机故障阶段处于检测状态; $\pi_M(i)$ 表示光伏阵列处于预防性维修状态; π_F 表示光伏阵列处于故障失效状态。

1.3 维修决策

将系统从全新状态投入运行到第一次更换, 记为一个更新周期。根据报酬更新过程定理^[24], 无限时间域的成本率等于一个更新周期的总成本率 C_s , 即更新周期内中总的成本同运行总时间的比值。本文从经济性角度出发, 选择最佳的检测频率 λ_m 和最佳的预防性维修阈值 N , 使得光伏发电系统长期稳定运行下总成本率 C_s 最低, 即

$$\text{Min}\{C_s\} = \sum C_i \quad (1)$$

式中, C_i 表示光伏发电系统中单个项目的成本率, 即单个项目运行成本和运行时间的比值, 主要包括停机损失费用率 C_{loss} 、预防性维修费用率 C_p 、故障后更换费用率 C_f 、故障小修费用率 C_m 、检测费用率 C_m 以及性能损失费用率 C_x 。

2 计及劣化状态和随机故障的光伏发电系统视情维修模型

2.1 光伏发电系统视情维修模型

光伏发电系统原理结构如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 光伏发电系统是由 K 个光伏阵列组成。

每个光伏阵列由 n 个光伏组串并联构成, 其中每个组串由 m 个光伏组件串联构成。光伏阵列性能随工作时间的增加逐渐劣化, 该过程根据光伏发电系统的阵列数定义 $K + 1$ 个性能劣化状态, 当 $i = 1$ 时表示光伏阵列性能是全新状态, 当 $i = K + 1 = F$ 时表示所有阵列都出现了故障, 此时需要更换阵列。假设多个阵列同时失效的概率可以忽略不计, 系统相邻劣化状态转移速率服从参数为 α_i 的指数分布, 单个组件的故障率为 λ_s , 则子阵列的故障率 λ_{array} 和系统的故障率 λ_{system} 分别为

$$\lambda_{\text{array}} = m \times n \times \lambda_s \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{system}} = \sum_K \lambda_{\text{array}} \quad (3)$$

光伏发电系统的性能下降被定义为光伏阵列的失效过程, 则相邻劣化状态转移速率 α_i 为

$$\alpha_i = (K + 1 - i) / K \times \lambda_{\text{system}} \quad (4)$$

在光伏阵列中除了组件退化导致的故障外主要还有接线盒(旁路二极管)、保险丝、连接器导致的突发故障, 当出现故障后及时进行维修。其故障率分别为 λ_j 、 λ_r 、 λ_d , 这些可以从现场统计的数据中确定。则随机故障转移速率为

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_k = \sum_K (\lambda_j + \lambda_r + \lambda_d) \quad (5)$$

假设在发生随机故障时, 可以立即进行维修, 且平均修复时间为 $1/u_i$ 。系统需要周期地检测光伏阵列状态, 以判断是否达到预防性维修阈值, 从而进行预防性维修, 平均检测间隔为 $1/\lambda_m$, 平均检测时间为 $1/u_m$ 。光伏阵列状态在达到预防性维修阈值 N 以后进行预防性维修, 以概率 p 修复如新, 以概率 q 修复至前一状态, 平均修复时间为 $1/u_m$ 。当光伏阵列状态达到故障状态 F 时进行故障后更换, 平均更换时间为 $1/u_f$ 。

根据马尔可夫链的性质^[25], 各个状态稳态分布的解析表达式可以通过一系列平衡方程来计算。所有的平衡方程可以根据稳态下的输入速率之和与输出速率之和来表述。例如对于工作状态 $\pi(1, 0)$, 有

$$\alpha_1 \pi(1, 0) = p u_m \pi_M(i) + u_f \pi_F \quad (6)$$

为了便于计算, 定义 $A(i, j) = \pi(i, j) / \pi(1, 0)$, $A_M(i) = \pi_M(i) / \pi(1, 0)$, $A_F = \pi_F / \pi(1, 0)$, 那么可以将平衡方程改成相应的形式。对应的工作状态有

$$A(i, 0) = \frac{\alpha_{i-1}}{\alpha_i} A(i-1, 0), 2 \leq i \leq N-1 \quad (7)$$

$$A(N, 0) = \frac{q u_m}{\alpha_n} A_M(N+1) + \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n} A(N-1, 0) \quad (8)$$

$$A(i,0) = \frac{qu_m}{\alpha_i + \lambda_{in}} A_M(i+1) + \frac{\alpha_{i-1}}{\alpha_i + \lambda_{in}} A(i-1,0), \quad (9)$$

$$N+1 \leq i \leq K-1$$

$$A(K,0) = \frac{\alpha_{K-1}}{\alpha_K + \lambda_{in}} A(K-1,0) \quad (10)$$

对于检测状态有:

$$A(i,1) = \frac{\lambda_{in}}{u_{in}} A(i,0), 1 \leq i \leq K \quad (11)$$

对于预防性维修状态有:

$$A_M(i) = \frac{u_{in}}{pu_m + qu_m} A(i,1), N+1 \leq i \leq K \quad (12)$$

对于更换状态有:

$$A_F = \frac{\alpha_K}{u_f} A(K,0) \quad (13)$$

对于随机故障状态有:

$$A(i,2) = \frac{\lambda_i}{\lambda_{in}} A(i,0), 1 \leq i \leq K \quad (14)$$

$$A(i,3) = \frac{\lambda_{in}}{u_i} A(i,2), 1 \leq i \leq K \quad (15)$$

根据稳态条件下各状态概率和为 1, 得

$$\pi(1,0) = \left(\sum_{i=1}^K A(i,0) + \sum_{i=1}^K A(i,1) + \sum_{i=1}^K A(i,2) + \sum_{i=1}^K A(i,3) + A_F + \sum_{i=N+1}^K A_M(i) \right)^{-1} \quad (16)$$

2.2 运行总成本率分析

系统长期运行总损失费用率主要包括检测、预防性维修、故障后更换和小修引起的停机损失费用率、预防性维修费用率、故障后更换费用率、故障小修费用率、检测费用率以及性能损失费用率。

停机损失费用率为

$$C_{loss} = \sum_{i=1}^K \pi(i,1) C_{loss}^1(i) + C_{loss}^F(1) \pi_F + \sum_{i=1}^K \pi(i,2) C_{loss}^2(i) + \sum_{i=N+1}^K \pi_M(i) C_{loss}^M(i) \quad (17)$$

$$C_{loss}^{(\alpha)}(i) = v c_o(i) t_w^{(\alpha)} \quad (18)$$

式中: $\alpha=1,2,F,M$; v 为容量因子; $c_o(i)$ 为在 α 阶段中达到状态 i 时的单位时间停机费用; $t_w^{(\alpha)}$ 为 α 阶段中各状态下平均停机时间; $C_{loss}^{(\alpha)}(i)$ 为在 α 阶段中达到状态 i 时的单次维修费用。

$$c_o(i) = \frac{P_{AS} H_A}{G_s T_G} K_D \delta_V(i) C_E \quad (19)$$

$$\delta_V(i) = \begin{cases} \frac{K+1-i}{K} & i \neq K+1 \\ 0 & i = K+1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_{AS} 为光伏阵列安装容量; H_A 为水平面太阳能年总辐照量; G_s 为标准测试下辐照度; T_G 为年总日照小时数; K_D 为综合效率系数; $\delta_V(i)$ 为状态 i 时的系统发电效率; C_E 为上网电价。

$$t_w^{(\alpha)} = \frac{t^{(\alpha)}}{w} \quad (21)$$

式中: $t^{(\alpha)}$ 为各阶段平均停机时间; w 为天气可及率。预防性更换费用率为

$$C_p = \sum_{i=N+1}^K C_p' u_m \pi_M(i) \quad (22)$$

式中, C_p' 为单次预防性维修费用。

故障后更换费用率为

$$C_f = C_f' u_f \pi_F \quad (23)$$

式中, C_f' 为单次更换费用。

检测费用率为

$$C_{in} = C_{in}' u_{in} \sum_{i=1}^K (\pi(i,1) + \pi(i,3)) \quad (24)$$

式中, C_{in}' 为单次检测费用。

小修费用率为

$$C_m = C_m' u_{in} \sum_{i=N+1}^K \pi(i,2) \quad (25)$$

式中, C_m' 为单次小修费用。

性能损失费用率为

$$C_x = c_o(1) - \sum_{i=1}^N c_o(i) \pi(i,0) \quad (26)$$

总成本率为

$$C_s = C_{loss} + C_p + C_f + C_{in} + C_m + C_x \quad (27)$$

3 基于改进黏菌优化算法的视情维修模型及最优维修策略求解

3.1 改进黏菌优化算法

黏菌优化算法(slime mould algorithm, SMA)是模拟黏菌个体振荡捕食行为提出的一种新型元启发式算法^[26], 它模拟了多头绒泡菌在觅食阶段寻找食物、包围食物的过程, 相比模拟退火算法(simulated annealing, SA)、灰狼算法(grey wolf optimizer, GWO)等寻优算法具有参数少、收敛精度高、迭代次数少的特点。黏菌寻找食物时其位置更新公式为

$$X(t+1) = \begin{cases} X_b(t) + v_b \cdot (W \cdot X_A(t) - X_B(t)), & r < p \\ v_c \cdot X(t), & r \geq p \end{cases} \quad (28)$$

$$\varphi = \tanh\left(-\frac{t}{t_{max}} + 1\right) \quad (29)$$

式中: $X_b(t)$ 为当前发现气味浓度最高的黏菌个体位置; $X_A(t)$ 和 $X_B(t)$ 分别为从群体中随机选取的两个个体的适应度值; t 为迭代次数; t_{\max} 为最大迭代次数; v_b 为 $[-\varphi, \varphi]$ 之间的振荡向量, 随着迭代次数增加逐渐趋近于零; v_c 为反馈因子; W 为自适应权值; r 为 $[0,1]$ 内的随机值, 用于模拟静脉收缩的不确定性; $S(i)$ 为 $X_B(t)$ 的适应度; D_F 为在所有迭代中获得的最佳适应度。

黏菌自适应权值 W 的表达式为

$$W(S_1(i)) = \begin{cases} 1 + r \cdot \lg\left(\frac{F_b - S(i)}{F_b - F_w} + 1\right), C \\ 1 - r \cdot \lg\left(\frac{F_b - S(i)}{F_b - F_w} + 1\right), \text{其他} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $S_1(i)$ 表示适应度序列; F_b 表示迭代过程中获得最佳适应度; F_w 表示迭代过程中获得最差适应度; C 表示 $S(i)$ 中排名前 50% 的种群。

传统的 SMA 虽然具有较强的全局寻优能力, 但在解决最优维修策略这一特殊问题时, 由于反馈因子 v_c 从 1 到 0 线性下降, 此时 v_c 不能准确反映食物位置和浓度之间的关系, 导致结果收敛速度较慢, 降低了算法的寻优效率。

因此, 本文在传统 SMA 的基础上, 采用一种改进的黏菌优化算法(improved slime mold algorithm, ISMA), 即设计自适应调节的反馈因子, 使得在迭代前期, 气味浓度较低时黏菌个体可大范围感知食物浓度, 加速反馈因子递减速度, 弱化反馈关系, 以实现更快的全局搜索。而在迭代后期, 气味浓度较高时, 保持稳定的反馈系数, 以探索最优解。自适应可调节反馈因子的数学模型描述为

$$v_c = e^{\frac{(t_{\max} - t)^y}{t_{\max}}} \quad (31)$$

式中: t_{\max} 为最大迭代次数; y 为调节因子。反馈因子改进前后对比如图 4 所示。

改进后的反馈因子在迭代前期下降速率较快, 反馈关系减弱, 能够获得较强的探索能力, 快速向全局最优值靠拢, 从而提高算法的收敛速度; 迭代后期反馈因子下降速率变缓, 反馈系数相对稳定, 能够提高跳出局部最优值的能力; 该自适应可调节反馈因子有利于平衡算法局部与全局搜索能力, 提高收敛速度, 增加寻优效率。

3.2 模型求解

整体优化策略的求解流程如图 5 所示, 步骤如下。

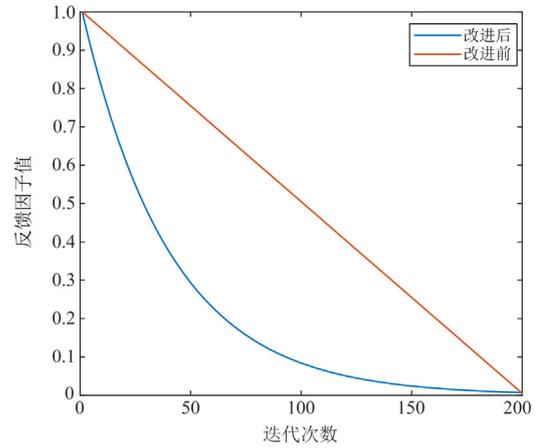


图 4 反馈因子变化图

Fig. 4 Feedback factor change chart

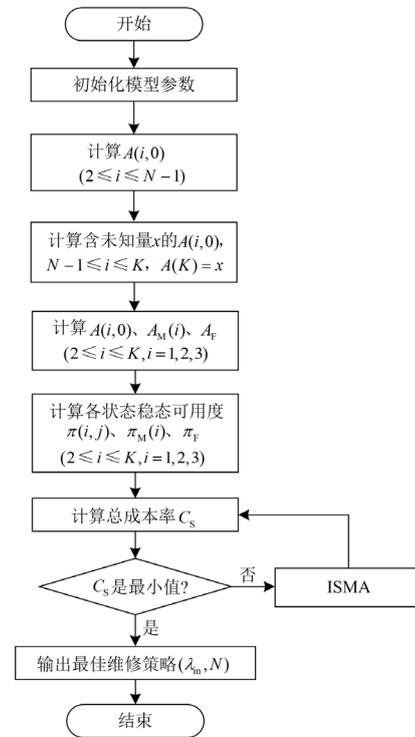


图 5 最佳维修策略求解流程

Fig. 5 Optimal maintenance strategy solving process

步骤 1 由 $A(i, j)$ 定义可得 $A(1, 0) = 1$; 根据式(7)计算 $A(i, 0) (2 \leq i \leq N-1)$ 。

步骤 2 设 $A(K) = x$, 根据式(10)一式(12)求得 $A(K-1, 0)$, $A(K, 1)$, $A_M(K)$ 。

步骤 3 根据式(9)一式(12)依次循环逆向求得含未知数 x 的 $A(i, 0)$, $A(i, 1)$, $A_M(i)$, $N \leq i \leq K$ 。

步骤 4 通过式(8)求得含未知数 x 的 $A(N-1, 0)$, 与式(6)联立求得未知数 x 的数值解。

步骤 5 根据式(8)、式(9), 求取 $A(i,0), A(i,1), A_M(i), N \leq i \leq K$ 的数值解。

步骤 6 根据式(13)一式(15)计算 $A_F, A(i,2), A(i,3), 1 \leq i \leq K$ 。

步骤 7 根据式(16)计算 $\pi(1,0)$ 。

步骤 8 根据定义计算光伏发电系统各状态稳态概率 $\pi(i,0) = A(i,0)\pi(1,0)$, $\pi(i,1) = A(i,1)\pi(1,0)$, $\pi(i,2) = A(i,2)\pi(1,0)$, $\pi(i,3) = A(i,3)\pi(1,0)$, $\pi_M(i) = A_M(i)\pi(1,0)$, $\pi_F = A_F\pi(1,0)$ 。

步骤 9 将上述各状态稳态概率代入式(17)一式(26)依次求得各费用率。通过式(27)求得总成本率。

步骤 10 通过 ISMA 算法寻找最佳 (λ_m, N) , 求得最小总成本率 $\text{Min}\{C_s\}$ 。

4 算例分析

4.1 案例

某光伏电站发电单元电气结构如图 1 所示。此发电单元的设计容量为 $P_{AS} = 225 \text{ kW}$, 它由 9 个光伏阵列组成, 每个光伏阵列的容量为 $P_s = P_{AS} / 9 = 25 \text{ kW}$, 每个阵列由 $m = 10$ 个组串并联而成, 每个组串由 $n = 12$ 个组件串联组成。根据光伏电站实际运营情况, 其所在位置水平面太阳能年总辐照量 $H_A = 1900 \text{ kWh/m}^2$, 标准测试下辐照度 $G_s = 1$, 年总日照时间 $T_G = 2778 \text{ h}$, 综合效率系数 $K_D = 0.8$, 上网电价 $C_E = 0.49 \text{ 元/kWh}$ 。

采集光伏阵列的维护时间和维护次数, 假设光伏阵列的平均预防性更换所需时间为 2 天, 即 $u_m = 0.0625$, 故障后平均更换时间为 10 天, 即 $u_f = 0.0125$, 每次检测和小修的时间为 1 天, 即 $u_{in} = 0.125$, $u_i = 0.125$ 。

依据文献[27]的故障统计数据, 各部件故障率参数和部件数量见表 1, 各维修方式下维修费用参数设置见表 2。SA 参数设定种群为 100, 迭代次数为 200; GWO 参数设定灰狼种群为 80, 迭代次数为 200; SMA 设定种群数目为 20, 迭代次数为 100。

表 1 光伏电站各部件故障率参数

Table 1 Failure rate parameters for each component of photovoltaic power plant

部件	故障率/(故障数/h)	部件数量/个
光伏组件	3.1×10^{-7}	1080
连接器	5.6×10^{-9}	2160
保险丝	1.8×10^{-6}	90
二极管	1.2×10^{-9}	90

表 2 光伏电站各维修方式下维修费用参数

Table 2 Parameters of maintenance costs under each maintenance method for PV power plants

	C'_p	C'_f	C'_m	C'_m
维修费用	34	340	0.05	0.05

4.2 检修策略分析

依据表 1 中各部件可靠性数据, 计算得出各状态初始转移速率, 采用编程软件对模型进行计算分析, 得到该系统的检测频率以及预防性维修阈值对总成本率的影响。

由图 6 可以看出, 在预防性维修阈值一定时, 随着检测频率的增加, 光伏阵列的总成本率先减小后增大。这是因为检测频率较低时造成光伏阵列“欠维修”, 影响光伏发电系统的发电效率, 造成电站大量的性能损失, 从而导致电站总成本率较高。随着检测频率的增加, 电站维护费用相应增加, 其发电效率逐渐增高, 电站运行损失费用率逐渐降低, 当达到某一阈值时, 光伏电站达到最佳检测频率。若继续增加检测频率, 一方面导致光伏电站的“过维修”, 造成大量的停机损失, 另一方面长期运行下电站的平均检测费用率会相应增加, 但是维修效果却不明显, 因此导致整个电站长期运行费用率增加。

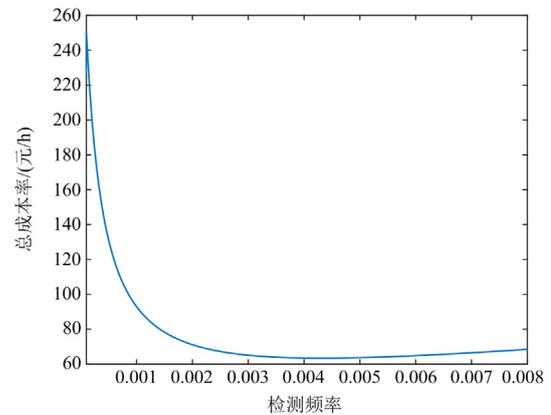


图 6 总成本率随检测频率变化关系

Fig. 6 Variation of total cost rate with inspection frequency

由图 7 可以看出, 在检测频率一定时, 随着预防性维修阈值的增加, 电站的总成本率也是先减少后逐渐增大。若预防性维修阈值过小, 光伏电站预防性维修提前, 不能充分利用光伏电站价值, 导致电站总成本率较高。随着预防性维修阈值的增加, 光伏电站的价值逐渐得到充分利用, 在达到某一最佳阈值时, 光伏电站总成本率最低。若继续增加预防性维修阈值, 导致系统发生非预期停机概率增大, 可能造

成电站故障后停机, 增加系统总成本率。因此, 须选择最佳维修策略使得光伏电站总成本率最低。

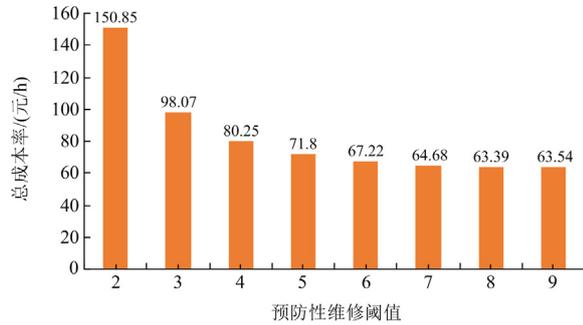


图7 总成本率随预防性维修阈值变化关系

Fig. 7 Relationship of total cost ratio with preventive maintenance thresholds

根据以上分析可得光伏发电系统长期运行总成本率随检测频率和预防性维修阈值变化曲线如图 8 所示。图 9 是采用 SA、SMA 和 ISMA 运行 30 次后求取平均值得到的收敛曲线图。从图 9 中可以看出, ISMA 算法在迭代 20 次左右达到收敛, 而 SMA 算法和 SA 算法分别达到 40 和 150 次左右达到收敛, 因此在寻优效率方面, 采用 ISMA 时迭代次数远少于其他两种算法, 耗时更短, 寻优效率更高。

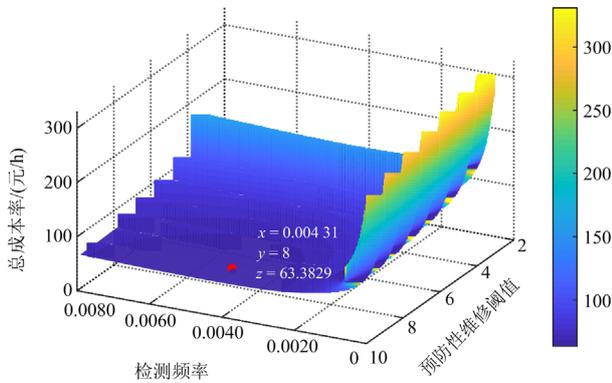


图8 总成本率随检测频率和预防性维修阈值变化曲线

Fig. 8 Variation curve of total cost rate with inspection frequency and preventive maintenance thresholds

通过寻优可得, 光伏发电系统在最佳的检测频率 $\lambda_m = 0.00431$ 、最佳的预防性维修阈值 $N = 8$ 时总成本率最低。

为了进一步验证 ISMA 算法对比其他优化算法在计算速度上的优越性, 本文将 SMA 算法和 SA 算法进行速度对比, 每个优化算法运行 100 次, 计算每次寻优的时间并记录, 各优化算法求解时间对比如图 10 所示。

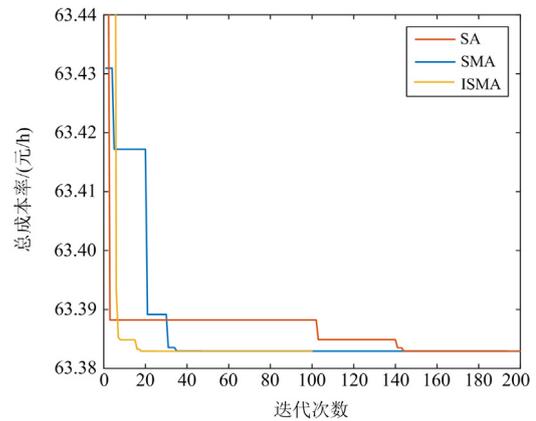


图9 各优化算法下的收敛曲线

Fig. 9 Convergence curves under various optimization algorithms

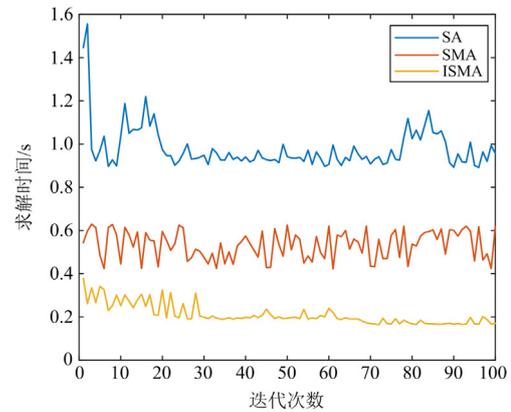


图10 各优化算法求解时间对比

Fig. 10 Comparison of solution time of various optimization algorithms

由图 10 可以看出, 在求解时间方面, ISMA 算法的求解速度整体上比 SA 算法和 SMA 算法要快; 多次运行下 ISMA 算法波动性最小, 其求解时间在 0.164~0.379 s 之间波动, SA 算法求解时间在 0.890~1.582 s 之间波动, SMA 算法在 0.422~0.629 s 之间波动, ISMA 算法的求解速度更快, 在实际应用中可以更好地满足要求。

在光伏电站实际维护过程中, 系统修复效果与实际维修人员的维修能力和技术条件有关。修复如新概率 p 则反映现有条件下光伏电站维修人员的维修能力和技术条件。当修复如新概率越高时, 反映光伏电站维修人员的维修能力越高、技术条件越好, 反之亦然。下面分别对不同修复概率下总成本率随检测频率和预防性维修阈值的变化情况进行分析, 其结果如图 11 和图 12 所示。

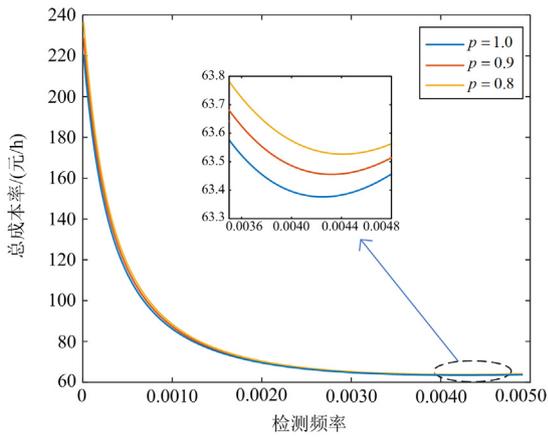


图 11 不同 p 条件下总成本率随检测频率变化

Fig. 11 Variation of total cost rate with detection frequency under different p conditions

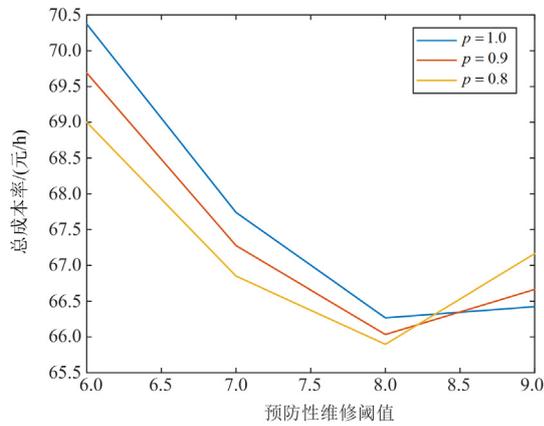


图 12 不同 p 条件下总成本率随预防性维修阈值变化

Fig. 12 Variation of total cost ratio with preventive maintenance threshold for different p conditions

图 11 是在最优预防性维修阈值下,总成本率随不同修复如新概率 p 和检测频率变化关系曲线。从图 11 可以看出,在相同检测频率下总成本率随 p 的提高而降低,并且 p 增大时光伏电站最佳检测频率随之减小。这是因为 p 越大,维护效果越好,需要预防性维修的频率相对降低,从而使得光伏电站总成本较低。图 12 是在最佳检测频率下,总成本率随不同修复如新概率和预防性维修阈值变化关系曲线。从图 12 可以看出,当预防性维修阈值较小时,在相同的预防性维修阈值下总成本率随修复如新概率 p 增大而增大,这是由于光伏电站此时运行状态良好,降低修复如新概率 p 的实际上避免了电站出现“过维修”,降低了此时进行视情维修的概率,从而使得电站总成本率有所降低。当预防性维修阈值较大时,光伏电站运行状态逐渐劣化,增加修复如

新概率 p 时光伏电站预防性维修效果更佳,使得电站总成本率有所降低。由此可见,在光伏电站预防性维修时维修阈值越大,对维修人员技能和检修条件要求越高,以此保证较好的维修能力使得系统维修后的恢复程度较大,从而减少光伏电站预防性维修次数,增强电站运行的经济性。

4.3 对比分析

不考虑随机故障时所建光伏发电系统视情维修模型如图 13 所示。

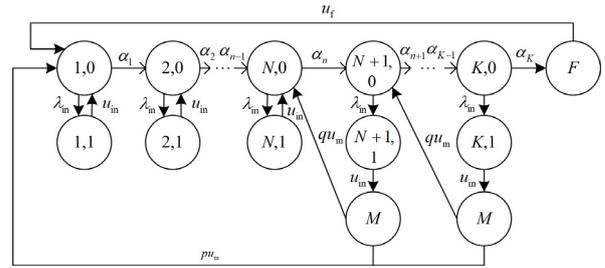


图 13 不考虑随机故障时光伏发电系统视情维修模型

Fig. 13 Dependent maintenance model of PV power system without considering random faults

依据表 1 中光伏电站各部件故障率参数以及对图 13 所建模型研究分析,计算出不考虑随机故障时光伏发电系统视情维修模型下的最佳维修策略,其寻优收敛曲线如图 14 所示,通过 ISMA 寻优可以得出,在不考虑随机故障时,此光伏发电系统的最佳检测频率 $\lambda_{in} = 0.00115$ 、最佳预防性维修阈值 $N = 7$ 时总成本率最低。

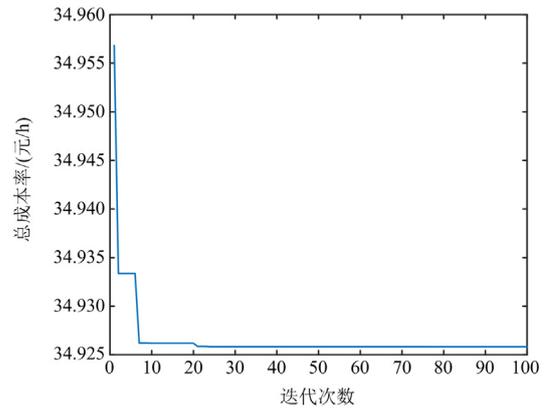


图 14 不考虑随机故障时的收敛曲线

Fig. 14 Convergence curve when random faults are not considered

表 3 给出了两种维修模型下最优视情维修策略的对比。从表 3 可以看出,考虑随机故障时,系统的最佳检测频率高于不考虑随机故障时的最佳检测频率,最佳预防性维修阈值高于不考虑随机故障时的最佳预防性维修阈值,总成本率低于不考虑随机

故障时的最小成本率。这是因为随机故障也会导致发电系统失效, 为了保证系统的安全性和经济性, 从而提高检测频率, 降低系统稳态运行下非预期随机故障带来的停机损失, 使得考虑随机故障时的总成本率低于未考虑随机故障时的总成本率。另外, 检测频率的提高增加了检测的费用, 为了避免过高的维修成本, 预防性维修阈值会相对提高。

表 3 两种维修模型最优视情维修策略对比

Table 3 Optimal contingent maintenance strategies for two maintenance models

	λ_m	N	C_s
考虑随机故障	0.004 31	8	63.4
不考虑随机故障	0.001 15	7	91.4

在考虑随机故障和未考虑随机故障时系统可用度和随机故障概率对比如图 15 所示。从图 15 可以看出, 考虑随机故障时, 系统长期稳定运行下的可用度高于未考虑随机故障时系统的可用度, 发生随机故障概率低于未考虑随机故障时的随机故障概率。这是因为考虑随机故障时, 检测频率增加, 当发生随机故障时可及时检出, 避免系统因随机故障导致非预期停机, 从而降低了随机故障概率, 增加了系统可用度。

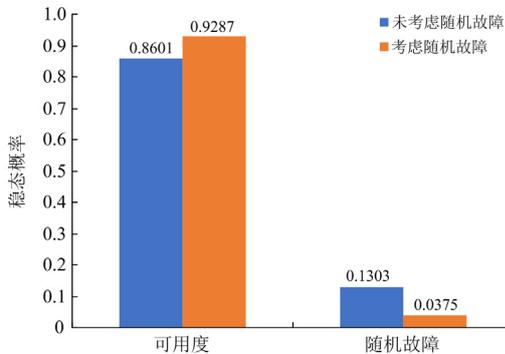


图 15 考虑随机故障和未考虑随机故障时系统可用度和随机故障概率对比图

Fig. 15 Comparison of system availability and probability of random faults when random faults are considered and when random faults are not considered

4.4 敏感性分析

为了说明本文所提光伏电站视情维修模型的性能和适用性, 本文对所提模型的成本参数进行了灵敏性分析。本文通过固定其余参数, 改变某一参数来分析此参数对最优维修策略的影响。

1) 最优维修策略对于检测费用的灵敏性分析

在光伏发电系统中, 由于投入的检测费用不同, 每次检测程度不一样, 电站的最佳检测频率也会不

同。在不同检测费用下带来的检修效果也不一样。在不同检测费用下检测频率、检测频率变化率、预防性维修阈值和总成本率的变化情况如图 16 所示。

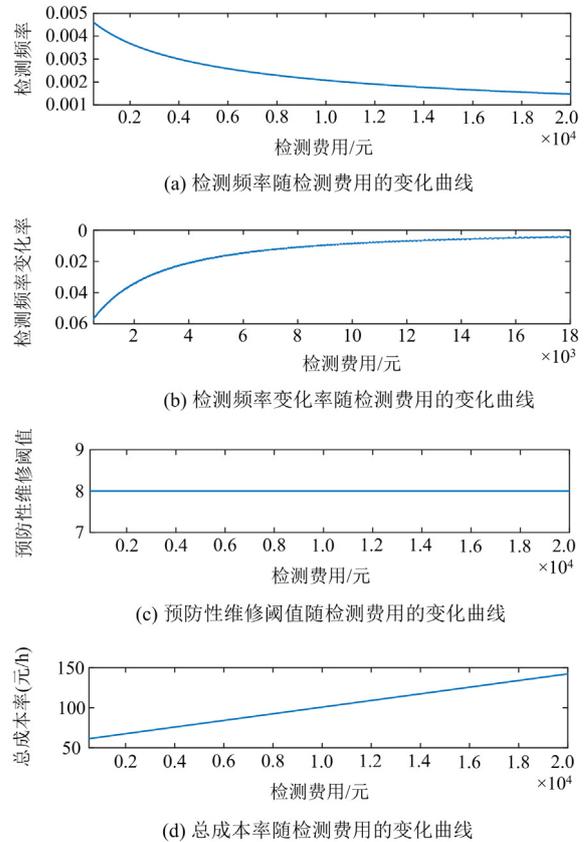


图 16 最优维修策略对于检测费用的敏感性分析

Fig. 16 Sensitivity analysis of optimal maintenance strategy to inspection costs

从图 16 可以看出, 检测频率和总成本率受检测费用的影响相对明显, 而预防性维修阈值对于检测费用的影响不太敏感。检测频率随检测费用的变化曲线如图 16(a)所示, 在检测费用较低时, 检测频率较高以增加电站运行的安全性, 随着检测费用逐渐增加, 为了避免其产生高昂的检测费用, 电站检测频率逐渐降低。其变化率如图 16(b)所示, 随着检测费用的增加, 检测频率变化率的绝对值逐渐减小直至趋于 0。从图 16(b)中可以看出, 光伏电站在单次检测费用为 14 000 元以下时, 随着检测费用增加, 检测频率变化率随之增加, 单次检测费用在达到 14 000 元以上时, 随着检测费用增加检测频率变化并不大, 此时再增加检测费用带来的检测效果基本不变。因此光伏电站在检测费用达到 14 000 元时可完全检测系统的状态, 建议此电站的最高检测费用在 14 000 元以内。

2) 最优维修策略对于预防性维修费用的灵敏性分析

图 17 描述了最优维修策略对于预防性维修费用的敏感性影响。从图 17 可以看出, 检测频率、预防性维修阈值以及总成本率均对预防性维修费用比较敏感。当预防性维修费用增加时, 为了避免过高的维修费用并使电站的价值得到充分利用, 检测频率逐渐降低, 预防性维修阈值逐渐增大。

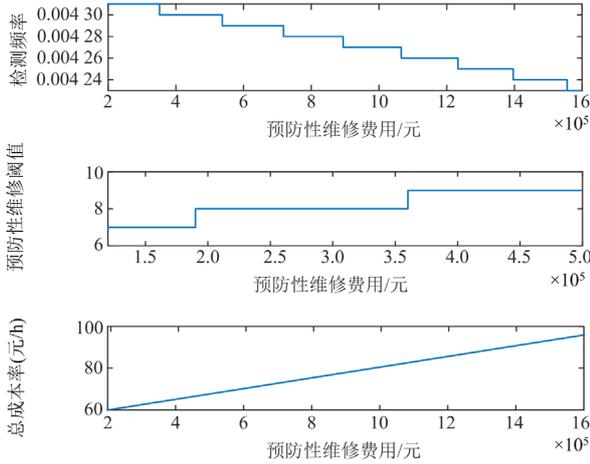


图 17 最优维修策略对于预防性维修费用的敏感性

Fig. 17 Sensitivity of the optimal maintenance strategy to preventive maintenance costs

3) 最优维修策略对于更换费用的灵敏性分析

图 18 描述了最优维修策略对于更换费用的敏感性影响。从图 18 可以看出, 检测频率和预防性维

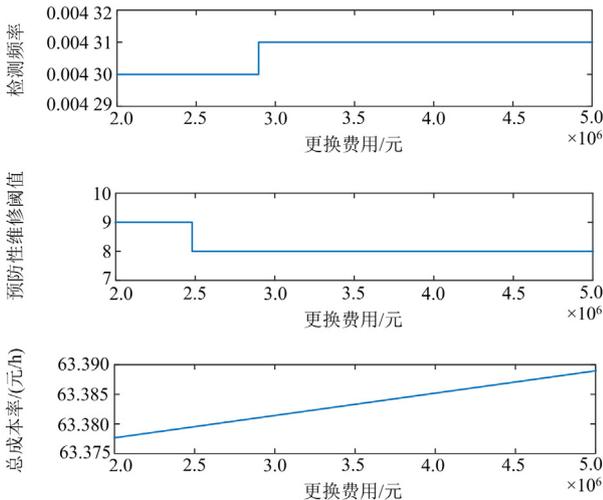


图 18 最优维修策略对于更换费用的敏感性

Fig. 18 Sensitivity of the optimal maintenance strategy to replacement costs

修阈值受更换费用的影响相对较小。随着更换费用的增加, 为了避免高昂的事故损, 检测频率增加, 预防性维修阈值下降以便及时准确地检测出系统当前状态, 减小事故发生概率。

4) 最优维修策略对于小修费用的灵敏性

图 19 描述了最优维修策略对于小修费用的敏感性影响。从图 19 可以看出, 检测频率和总成本率对于小修费用的敏感性比较明显, 预防性维修阈值对于小修费用不太敏感。随着小修费用的增加, 为了避免电站出现随机故障时造成较大的维修费用和停机损失, 检测频率逐渐增加, 以保证电站运行的可靠性和经济性。因此为了保证光伏电站安全可靠运行, 随机故障也是不可忽略的。

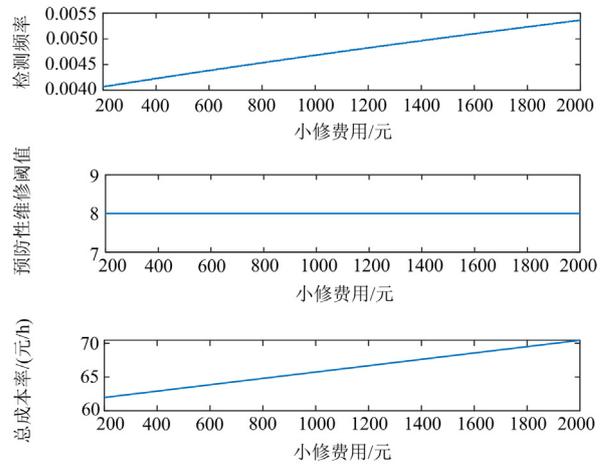


图 19 最优维修策略对于小修费用的敏感性

Fig. 19 Sensitivity of the optimal maintenance strategy to the cost of minor repairs

4.5 不同地区最佳检测频率

不同地区光伏电站所处地理位置不同, 因此各地区平均太阳能年总辐射量各不相同, 导致不同地区光伏电站最佳检测频率也有所不同。若将上述规模光伏电站分别建在我国不同地区, 则各地区光伏电站最佳检测频率如表 4 所示。

表 4 不同地区最佳检测频率

Table 4 Optimal frequency of testing in different regions

地区	平均太阳能年总辐射量/(kWh/m ²)	最佳检测频率
华北	1445	0.004 13
东北	1422	0.004 12
西北	1629	0.004 17
华东	1331	0.004 10
华中	1271	0.004 08
西南	1141	0.004 05

从表 4 可以看出, 随着平均太阳能年总辐射量的增加, 所在地区光伏电站最佳频率相应增加。在平均太阳能年总辐射量最高的西北地区, 最佳检测频率 $\lambda_m = 0.00417$, 在平均太阳能年总辐射量最弱的西南地区, 最佳检测频率 $\lambda_m = 0.00405$ 。这是因为在不同年总辐射量下, 发电量不相同, 总辐射量大的地区带来的经济效益更优, 若电站产生故障将带来巨大的经济损失, 因此在总辐射量大的地区检测频率更高。

5 结论

本文在考虑劣化状态和随机故障的基础上构建光伏发电系统视情维修模型, 并运用 ISMA 算法进行求解, 确定了光伏发电系统的最佳预防性维修阈值和最优检测周期。在此基础上和没有考虑随机故障的维修模型进行对比, 结果表明, 考虑随机故障建模时可增加光伏发电系统的可用度 6.8%, 降低系统运行的总成本率 30.6%, 所建模型为光伏发电的检修维护提供了新的思路。在研究过程中, 未考虑检测时由于人工经验不足导致漏检、过检等不完全检测对于光伏发电系统维修策略的影响, 这将在下一步展开研究。

参考文献

- [1] PETERS L, MADLENER R. Economic evaluation of maintenance strategies for ground-mounted solar photovoltaic plants[J]. *Applied Energy*, 2017, 199: 264-280.
- [2] ERYILMAZ S. Revisiting discrete time age replacement policy for phase-type lifetime distributions[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 295(2): 699-704.
- [3] 赵君宇, 高山, 徐路, 等. 考虑台风影响的海上风电机组双层检修策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 121-130. ZHAO Junyu, GAO Shan, XU Lu, et al. Double-layer maintenance strategy for offshore wind turbines considering impact of typhoon[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 121-130.
- [4] ALTAMIMI A, JAYAWEERA D. Reliability of power systems with climate change impacts on hierarchical levels of PV systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2021, 190: 106830-106843.
- [5] VILLARINI M, CESAROTTI V, ALFONSI L, et al. Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a FMEA approach based on real data[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 152: 1-12.
- [6] GOLNAS A. PV system reliability: an operator's perspective[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, 3(1): 416-421.
- [7] 李生虎, 赵慧洁, 周慧敏, 等. 基于可靠性灵敏度的 UHVDC 系统预防性检修优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3): 68-75. LI Shenghu, ZHAO Huijie, ZHOU Huimin, et al. Reliability sensitivity-based optimization for a UHVDC transmission system with preventive maintenance[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(3): 68-75.
- [8] TIAN Zhigang, JIN Tongdan, WU Bairong, et al. Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(5): 1502-1509.
- [9] 罗凤章, 张天宇, 王成山, 等. 基于多状态马尔科夫链的配电设备状态检修策略优化方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2777-2787. LUO Fengzhang, ZHANG Tianyu, WANG Chengshan, et al. Research on optimization method of condition based maintenance strategy for distribution system equipment based on the multi state Markov chain[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2777-2787.
- [10] 叶远波, 谢民, 陈晓东, 等. 基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(7): 167-173. YE Yuanbo, XIE Min, CHEN Xiaodong, et al. A condition-based maintenance strategy for a relay protection system based on failure probability analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(7): 167-173.
- [11] BAKLOUTI A, MIFDAL L, DELLAGI S, et al. An optimal preventive maintenance policy for a solar photovoltaic system[J]. *Sustainability*, 2020, 12(10): 4266-4279.
- [12] 尹德扬, 梅飞, 郑建勇, 等. 分布式光伏系统最优运维周期确定方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(5): 1-7. YIN Deyang, MEI Fei, ZHENG Jianyong, et al. Determination method of optimal operation and maintenance cycles for distributed photovoltaic system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(5): 1-7.
- [13] HUANG Chunchi. Intelligent maintenance scheduling system for maximum performance of solar-energy-generating system[J]. *Sensors and Materials*, 2017, 29(11): 1579-1588.
- [14] 颜云松, 孙宁, 张楠, 等. 基于预防检修周期优化的电网稳定控制系统失效风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(17): 139-146. YAN Yunsong, SUN Ning, ZHANG Nan, et al. Evaluation of unavailability risk of the security and stability control system of power systems based on optimization of the preventive maintenance period[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(17): 139-146.
- [15] 叶远波, 刘宏君, 黄太贵, 等. 变电站继电保护设备状

- 态检修可靠性分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 170-177.
- YE Yuanbo, LIU Hongjun, HUANG Taigui, et al. Research on the reliability analysis method of condition-based maintenance of relay protection equipment in substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 170-177.
- [16] 苏春, 陈武. 考虑部件经济相关性的风力机系统状态维修优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 1007-1012.
- SU Chun, CHEN Wu. Optimization of condition-based maintenance for wind turbine system considering economic dependence among components[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 1007-1012.
- [17] DUC-HANH D, PHUC D, IUNG B. Multi-level opportunistic predictive maintenance for multi-component systems with economic dependence and assembly/disassembly impacts[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 217: 108055-108071.
- [18] LI Xubin, CHEN Wei, LEI Huan, et al. A double-layer optimization maintenance strategy for photovoltaic power generation systems considering component correlation and availability[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 850954.
- [19] 朱晓荣, 刘亚维. 基于元件-系统分级优化的光伏电站维护策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 92-99.
- ZHU Xiaorong, LIU Yawei. Maintenance strategy of photovoltaic power station based on component-system classification optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 92-99.
- [20] 陈伟, 李旭斌, 纪青春, 等. 一种基于关联集和可用度的光伏发电系统维护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 94-104.
- CHEN Wei, LI Xubin, JI Qingchun, et al. A maintenance strategy for a photovoltaic power generation system based on an associative set and availability[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 94-104.
- [21] 徐孙庆, 耿俊豹, 魏曙寰, 等. 考虑相关性的串联系统动态机会成组维修优化[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(6): 1411-1416.
- XU Sunqing, GENG Junbao, WEI Shuhuan, et al. Dynamic opportunistic grouping maintenance optimisation for series systems considering dependencies[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(6): 1411-1416.
- [22] 马维宁, 胡起伟, 杨志远. 考虑退化相关的装备多部件系统维修决策优化模型[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(4): 1424-1432.
- MA Weining, HU Qiwei, YANG Zhiyuan. Maintenance decision model of equipment multi-component systems with degradation dependence[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(4): 1424-1432.
- [23] GALLARDO-SAAVEDRA S, HERNANDEZ-CALLEJO L, DUQUE-PEREZ O. Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants[J]. Energy, 2019, 183: 825-836.
- [24] 王泽洲, 陈云翔, 蔡忠义, 等. 不确定失效阈值影响下考虑设备剩余寿命预测信息的最优替换策略[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(1): 145-154.
- WANG Zezhou, CHEN Yunxiang, CAI Zhongyi, et al. Optimal replacement strategy considering equipment remaining useful lifetime prediction information under the influence of uncertain failure threshold[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(1): 145-154.
- [25] ETHIER S N, KURTZ T G. Markov processes: characterization and convergence[M]. John Wiley & Sons, 2009.
- [26] LI Shimin, CHEN Huiling, WANG Mingjing, et al. Slime mould algorithm: a new method for stochastic optimization[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 111: 300-323.
- [27] SPERTINO F, CHIODO E, CIOCIA A, et al. Maintenance activity, reliability, availability, and related energy losses in ten operating photovoltaic systems up to 1.8 MW[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 83-93.

收稿日期: 2023-08-25; 修回日期: 2024-03-27

作者简介:

陈伟(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电与综合能源利用; E-mail: 80658253@qq.com

孙存育(1997—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为光伏发电与智能运维。E-mail: 2233284408@qq.com

(编辑 周金梅)