

考虑风光出力不确定性的新型电力系统 实时运行状态检修决策技术

冯永青, 董芸州, 陈冠良, 尹朝娜, 朱传谱, 李经泽

(海南电网有限责任公司, 海南海口 570203)

摘要: 当前对于新型电力系统实时运行状态检修决策多采用动态贝叶斯网络, 通过对系统运行状态进行监测并制定检修决策, 但由于缺少对系统状态的实时跟踪, 导致通过检修决策后系统的运行充裕度较低, 运行安全性不高。为此, 提出考虑风光出力不确定性的新型电力系统实时运行状态检修决策技术。根据风光出力的不确定性与波动性, 采用区块链技术挖掘系统运行状态参量, 结合系统检修计划的制定原则与劣化过程, 计算检修决策的前瞻时间, 并以检修系统的滚动周期作为最小检修周期来跟踪系统状态的实时变化, 基于此, 以系统运行风险最小为目标建立检修决策模型, 引入果蝇优化算法进行求解, 从而输出系统运行状态检修决策方案。实例应用结果显示, 应用所提的检修决策后, 系统的运行充裕度较高, 保证了运行安全性。

关键词: 风光出力不确定性; 新型电力系统; 运行状态; 检修决策

中图分类号: TP18; TM769 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)09-0029-05

New Real time Operation Status Maintenance Decision Technology for Power Systems Considering the Uncertainty of Wind and Solar Power Output

FENG Yongqing, DONG Yunzhou, CHEN Guanliang, YIN Chaona, ZHU Chuanpu, LI Jingze

(Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570203, China)

Abstract: Currently, dynamic Bayesian networks are commonly used for real-time maintenance decisions of new power systems, which monitor the system's operating status and make maintenance decisions. However, due to the lack of real-time tracking of the system's status, the system's operational adequacy is low and operational safety is not high after maintenance decisions are made. Therefore, a new real-time operation status maintenance decision-making technology for power systems considering the uncertainty of wind and solar power output is proposed. Based on the uncertainty and volatility of wind and solar power output, blockchain technology is used to mine the operating status parameters of the system. Combined with the principles of formulating system maintenance plans and the degradation process, the forward-looking time of maintenance decisions is calculated, and the rolling cycle of the maintenance system is used as the minimum maintenance cycle to track real-time changes in the system status. Based on this, a maintenance decision model is established with the goal of minimizing system operation risk. It introduces the fruit fly optimization algorithm for solving, in order to output the system operation status maintenance decision plan. The application results of the example show that after the maintenance decision proposed by the application, the system has a high level of operational adequacy, ensuring operational safety.

Keywords: uncertainty in wind and solar power output; new power system; operating status; maintenance decisions

0 引言

当前, 风能和太阳能作为电力系统中可再生能源的重要形式, 其输出特性与传统能源有显著差异, 具有间歇性和不确定性特征。这些特性给电力系统的运行和维护带来了巨大的挑战, 如何有效应对风能和太阳能输出的不确定性成为研究的热点和难点。

电力系统运行的传统维护技术主要包括定期维护、故障维护和状态维护。定期维护是指在特定时间段内对

设备进行运行状况检查, 并针对故障类型进行针对性维护, 以恢复系统的正常运行。状态维护是指对系统的运行状态进行监测和分析, 并根据实际情况进行维护。然而, 这些传统方法往往无法有效解决风能和太阳能输出的不确定性。

文献[1]通过对每个子系统进行单元测试, 以确保子系统之间的协调性和稳定性, 并采用基于状态的维护策略, 监测和分析二次系统的运行状态, 确定故障位置和原因, 并制定相应的维护计划。该方法通过使用模拟测试和半物理测试方法, 可以在短时间内测试大量设备, 能够最大限度地提升系统的检修效率, 同时无需大量的人力

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB1507100)

收稿日期: 2024-01-15

与物力投入,使得检修成本较低。但无法识别和解决潜在的问题和故障,不能保证系统的可靠性和稳定性。文献[2]对电力系统主要出现的故障类型与引起的原因进行分析,包括短路、断路、接触不良、过载、泄漏等。随后,针对不同类型的故障提出了具体的维修策略,包括定期维修和故障维修。该方法能够实现精准的故障诊断与预防性维护。但对于复杂环境下系统的运行状态无法实现准确的实时监测,导致此方法的实际应用效果不佳。

考虑到风能和太阳能输出的不确定性以及传统电力系统运行状态维护技术的局限性,研究一种考虑风能和太阳能发电输出不确定性的新型电力系统实时运行状态维护决策技术具有重要意义。该技术可以通过分析和挖掘系统运行数据,为电力系统检修决策技术的规划提供了一种新思路。

1 新型电力系统实时运行状态检修决策技术设计

1.1 考虑风光出力不确定性的电力系统实时状态参量智能挖掘

为了保证电力系统的运行可靠性,将状态检修的概念融入系统检修决策中,形成系统检修决策问题。因此,为了实现对系统实时运行状态的在线监测,需要对系统状态参数进行高频挖掘,以获得能够在计划时间内表征系统运行状态的特征信息^[3]。本研究充分考虑风光出力的不确定性,采用区块链技术对电力系统实时状态参量进行智能化挖掘。其基本挖掘过程如图1所示。



图1 电力系统实时状态参量智能挖掘过程

依据图1对系统运行状态参量进行实时挖掘。在感知层对本地通信以及传输信息进行汇总,并对其进行局部计算^[4],目的是将初步采集的参数转换为本地计算中心可以识别的格式,计算公式为

$$a' = a \sqrt{\left\| \frac{d_s}{c_0} \right\|^2} \quad (1)$$

式中, a 表示初步采集的本地特征参数; d_s 表示小波熵转换系数; c_0 表示特征矩阵。

本地计算中心将回传的数据源分解为零序电压并保存在存储层^[5],表达式为

$$u_0 = a' \sum \frac{s_0 \times n'}{q_1} \quad (2)$$

式中, a' 表示预处理后的采集数据; s_0 表示数据抽取的离散系数; n' 表示系统支路数目; q_1 表示系统监测频率。

在共识层处理和集成零序电压,并将区块链技术收集的哈希状态数据与块头进行匹配^[6-8]。匹配的计算公式为

$$W_p = \frac{u_0 \times p_t + A_s}{g_0^k \times A_k} + \frac{A_s}{2} \quad (3)$$

式中, p_t 表示状态量的循环迭代数据; g_0^k 表示第 k 个区块的签名内容; A_k 表示转换矩阵; A_s 表示区块的授权对象。

在挖掘电网系统运行状态参数的过程中,考虑到本文提出的风能和太阳能发电量的不确定性,因此,主要基于各自的预测输出来优化风能和太阳能的发电量调度安排。根据风能和太阳能输出的随机波动,采用超立方体采样来减少风能和太阳能的输出场景类型,然后获得风能和太阳能发电输出的场景约束,具体表达式为

$$G_s = \frac{v_b \times j_0}{M_t} \quad (4)$$

式中, v_b 表示机组的预测出力; j_0 表示能量转换系数; M_t 表示系统中设备 t 的运行效率。

进而将基于风、光出力的场景约束条件与数据匹配结果汇总到各个区块头中,实现对电力系统实时运行状态参量的挖掘^[9-10]。表达式为

$$Q_t = \frac{W_p \times G_s}{\sqrt{\sum V_s / h_0}} \quad (5)$$

式中, V_s 表示系统的潮流变化熵; h_0 表示系统拓扑结构脆弱度。

根据以上计算与分析过程,结合风光出力的不确定性,完成对电力系统实时状态参量的智能挖掘,为后续确定系统检修决策前瞻时间提供数据基础。

1.2 系统检修决策前瞻时间计算

在电力系统维护决策中,根据制定系统维护计划的原则,系统的运行状态可分为3种类型:系统从正常状态过渡到轻度退化状态,从轻度退化状态过渡到严重退化状态,以及系统处于故障状态。在上述分析的基础上,结合系统运行状态的特征参数,对系统状态变化进行实时跟踪^[11]。在规划时间内,及时调整未实施的维护计划,进而计算系统维护决策的前瞻性时间。

系统运行状态的转变符合辅助状态转移原理,即系统在正常到故障的状态变化里是逐级改变的^[12-13]。因此,系统状态转移速率矩阵可表示为

$$w_k = \begin{bmatrix} -\delta_{12} & \delta_{12} & 0 & 0 \\ 0 & -\delta_{23} & \delta_{23} & 0 \\ 0 & 0 & -\delta_{34} & \delta_{34} \\ 0 & 0 & 0 & \delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, δ_{mn} 表示在 m 时段内系统处于 n 状态的概率。

在已知系统初始运行状态的条件下,采用福克普朗克方程确定系统的瞬时状态改变概率^[14],即

$$p_s = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{g_p \sum Q_t}{w_k}} \quad (7)$$

式中, n' 表示系统状态类型,本文取4; g_p 表示系统状态监测的置信范围; Q_t 表示系统实时运行状态参量的挖掘结果^[15]。

则系统状态在特定时间段内的瞬时可用度 $A(t)$ 为

$$A(t) = p_s \times u_p + \frac{f_s}{a_0} \quad (8)$$

式中, d_p 表示系统正序电压分量; f_s 表示状态函数; a_0 表示运行状态实时数据向量。

假设系统的完全检修概率为 $P(s)$,则在时刻 t_0 系统依旧处于工作状态的功率为

$$e(p_b) = \sum \sum \frac{A(t)}{F_{t_0}} / j_i \quad (9)$$

式中, F_{t_0} 表示柯尔莫哥洛夫向前方程; j_i 表示系统检修前的故障率。

采用多变量非线性函数对上式进行求解,可得系统首次寿命分布函数的表达式为

$$H(t) = \sqrt{\frac{e(p_b) \cdot D_0}{r_s}} \quad (10)$$

式中, D_0 表示多变量非线性函数; r_s 表示系统寿命概率密度函数。

针对待检修系统的滚动周期可由下式确定,即

$$t_j = \frac{1}{\lambda_0} \ln \frac{H(t) - I(s)}{2\theta_0} \quad (11)$$

式中, λ_0 表示状态转移概率阈值; $I(s)$ 表示结构函数; θ_0 表示待修集。

为了跟踪系统的实时状态变化,以检修系统的滚动周期作为最小检修周期,则预防性检修时机函数可表示为

$$Z(t) = \frac{t_j}{w_s} \times \alpha_i \quad (12)$$

式中, w_s 表示系统主从关联中主设备的数量; α_i 表示故障修复率。

基于式(12),可得在 $[0, t_1]$ 时段内系统的平均故障次数为

$$q_g = \int_0^{t_1} Z(t) \times u_x \times \beta_0 dt_i \quad (13)$$

式中, u_x 表示系统运行的属性约束; β_0 表示运行状态参量

的一阶滞后变量。

则主从关联集的工作概率可表示为

$$p_z = q_g \sum \sum \sqrt{\|M_r\|^2} \quad (14)$$

式中, M_r 表示主设备可靠运行至检修时刻的运行时长。

由此,将系统中全部设备的时变滚动周期作为系统检修决策的前瞻时间,计算公式如下:

$$T_o = \sqrt{\frac{q_g \times r_p}{\sum c_s / h_i}} \quad (15)$$

式中, r_p 表示系统剩余无故障工作时间; c_s 表示衰减常数的截尾分布; h_i 表示系统故障风险系数。

结合新型电力系统实时运行状态的参量挖掘结果与系统运行状态类型,计算系统状态在特定时间段内的瞬时可用度,并求取预防性检修时机函数,进而确定电力系统检修决策的前瞻时间,为最终实现系统检修决策奠定了基础。

1.3 电力系统检修决策输出

设置电力系统运行状态的安全状态阈值,通过对比每一时刻计算结果与安全状态阈值,实现对系统运行状况的判断。根据系统检修决策的前瞻时间,得到系统运行参数相应的变化向量,表达式为

$$j_k = \ln \left(\sum X(a) \times T_o / L_s \right) \quad (16)$$

式中, $X(a)$ 表示参数重叠率; T_o 表示系统检修前瞻时间; L_s 表示参数数据长度。

因此,系统的检修概率近似等于检修资源的最小可用量,即

$$P_g = \sqrt{|j_k|^2} / \frac{r_b}{t_p} \quad (17)$$

式中, r_b 表示观测状态因子; t_p 表示检修耗费的时间。

为使在检修前后系统的状态决策量之和最小,则需对检修时间与检修资源进行约束,公式如下:

$$\begin{cases} \phi_i = P_g \sqrt{\frac{G(t)}{y'}} \\ \phi_i = P_g \sum \frac{N_f}{N_x} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $G(t)$ 表示检修场景导致的系统运行风险; y' 表示期望失负荷量; N_f 、 N_x 分别表示已检修设备个数和待检修设备个数。

考虑相应的约束条件,为将系统的运行风险控制最低,以此为目标,搭建检修决策模型,即

$$\psi = P_g \times \mathcal{Q}_0 \times \kappa_f \quad (19)$$

式中, \mathcal{Q}_0 表示系统对检修资源的需求量; κ_f 表示度量函数; ψ 表示系统运行风险。

对于上述搭建的复杂模型,本文引入果蝇算法求取

模型的最佳解析解,具体步骤如下。

以系统运行参量 Q_i 为参照点,计算距离该参照点最近的果蝇位置,并进行标记,即

$$d_{e,Q_i} = f_j \times s_n \quad (20)$$

式中, f_j 表示与参照点最近的果蝇的飞行步长; s_n 表示果蝇种群规模。

以目标函数的运算误差最小值作为迭代运算的适应度基准值,并对个体的位置进行更新,即

$$c' = d_{e,Q_i} / K_o \quad (21)$$

式中, K_o 表示果蝇个体数量。

给定一个随机数,用于个体更新位置的依据,表达式如下:

$$R_{an} = c' \times \tau \times \zeta_o \quad (22)$$

式中, τ 表示随机数; ζ_o 表示状态信息序列。

判断算法的终止条件是否满足预设条件,若是,则停止运算,若否,则继续进行迭代更新。

输出目标函数对应的果蝇位置,即全局最优个体的坐标,作为系统检修决策方案,以此实现电力系统检修决策输出。至此,完成考虑风光出力不确定性的新型电力系统实时运行状态检修决策技术的设计。

2 实例论证分析

2.1 实验准备

实验以某实际新型电力系统为研究案例,测试本文设计的考虑风光出力不确定性的新型电力系统实时运行状态检修决策技术的性能。

该新型电力系统是一种基于风能和太阳能的混合供电系统,具有较高的能量转换效率和环保性能。该系统主要由风力涡轮机、太阳能电池板、电池储能单元、配电线路、电力电子转换器等组成。风力涡轮机每台额定输出功率为2 MW;每块太阳能电池板的额定输出功率为250 W。这些电池板通过串联和并联形成10个电池组,每个电池组的输出电压为48 V;电池储能装置每个单元的额定容量为100 kW·h;电力电子转换器:该系统包括5个电力电子转换器,每个转换器的额定输入功率为2 MW,额定输出功率为1 MW。

该系统包括5条配电线路,每条配电线路的额定传输功率为10 MW。这些配电线路连接风力涡轮机、太阳能电池板和电池储能单元,将电力传输到负载中心。在系统启动时,风力涡轮机和太阳能电池板同时开始工作。系统的其他运行参数如表1所示。

考虑到系统各设备在规格和运行状态个体上的差异,以该系统故障率参数为依据,将故障次数界限设置为0.4次,并对设备的可靠性参数作统一化处理,便于后续研

究与分析。

表1 系统运行参数

参数	数值
风力发电机组实际功率波动范围	±20%
太阳能电池板实际功率波动范围	±15%
电池储能单元每年实际容量下降率	5%
系统总输出功率波动范围(考虑风光不确定性)	±30%

2.2 实验说明

利用本文设计的方法挖掘该电力系统运行状态的关键参数,并依据前文所述方法计算系统检修的前瞻时间,具体如表2所示。

表2 系统检修决策的滚动周期与前瞻时间

电网设备	滚动周期/周	前瞻时间/周
变压器(待修)	3	48
线路(待修)	1	16
变压器(非待修)	53	0
线路(非待修)	2	0

设定果蝇优化算法中的相关参数如下:果蝇群体大小为200,搜索空间范围为[0,100],搜索步长为0.5,最大迭代次数为150,个体初始位置坐标(5,10),随机数为0.2。

基于以上分析,采用本文方法进行系统运行状态检修决策方案的制定,并根据应用结果分析本文方法的有效性。

2.3 系统检修决策应用结果分析

采用激光测距传感技术(方法1)、物联网技术(方法2)作为本文方法的对比方法。分别采用3种方法针对该电力系统制定检修决策,并比较基于不同方法下系统的运行总风险值,从而比较各方法的应用效果,对比结果如图2所示。

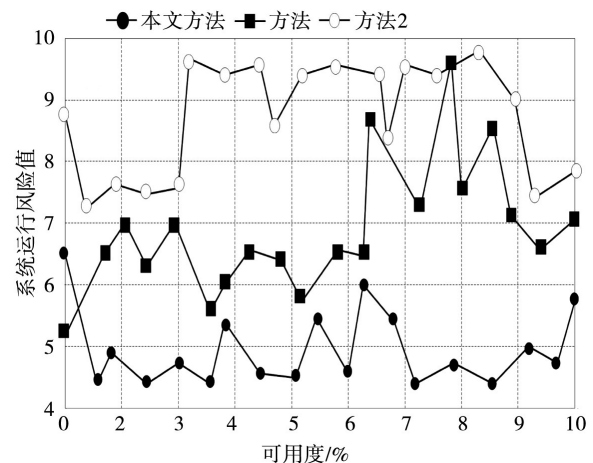


图2 系统运行总风险对比结果

根据图2,在系统设备的不同可用度情况下,分别采用对照组方法与本文方法设计系统运行状态检修决策,通过对比可以看出,基于本文检修决策下的系统运行总

风险值更小,表明应用本文的检修决策可以保障系统的稳定安全运行,能够有效降低系统的运行风险。方法1与方法2制定的系统运行状态检修决策应用效果较差的原因主要是忽略了系统可用度特性的变化对系统运行状态的影响,从而影响了应用性能。

2.4 对比实验分析

为进一步验证本文方法的可靠性,结合上述实验结果,比较与分析基于不同方法下系统的运行充裕度,运行充裕度越高,表明系统的安全性越好。系统运行充裕度的计算公式如下。

$$\varpi = \frac{q_p - k_m}{k_m} \times 100\% \quad (23)$$

式中, q_p 表示供给容量; k_m 表示负荷容量。

利用上式分别计算通过各种检修决策后的系统运行充裕度,对比结果如图3所示。

由图3可直观看出,在电力系统运行时间为2~10 h内,应用本文设计的检修决策后,系统的运行充裕度显著高于应用方法1与方法2后的系统运行充裕度,进一步证明了本文方法能够有效保证系统的运行安全性,说明本文方法的应用效果更佳。

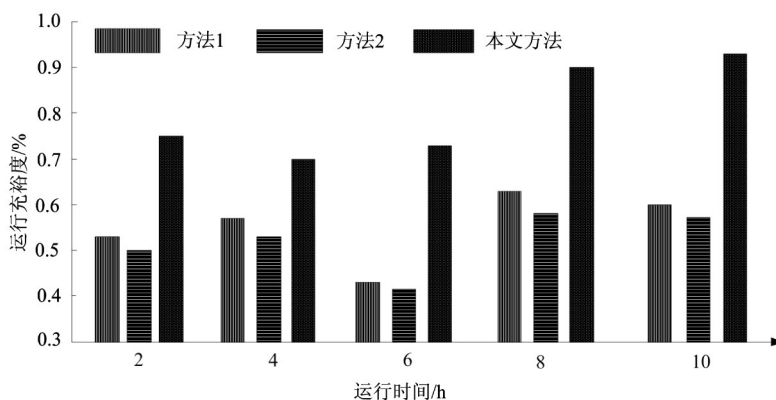


图3 系统运行充裕度对比结果

3 结束语

本文通过对风能和太阳能输出不确定性的处理方法以及电力系统运行状态维护技术的深入分析和研究,提出了一种新的实时运行状态维护决策技术。该技术可以实时监测电力系统的运行状态,充分考虑风能和太阳能输出的不确定性对系统的影响,并通过优化决策方法制定有效的维护策略,提高电力系统的安全性、稳定性和可靠性。然而,这项技术仍然存在一定的局限性和挑战,需要进一步研究和改进。未来,可以将更多智能算法和优化技术相结合,不断完善和优化实时运行状态维护决策技术,为电力系统安全稳定运行提供更可靠的技术支持。

参考文献:

- [1] 高好婧. 智能化变电站二次系统调试与检修技术措施研究[J]. 模具制造, 2023, 23(10): 196-198.
- [2] 帕力旦·乌休尔. 电力系统电气设备的故障诊断与检修对策[J]. 中国高新科技, 2022(16): 23-25.
- [3] 于培永, 郭志刚, 刘月浩. 基于动态贝叶斯网络的三维电力检修系统[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(9): 180-182.
- [4] 程六平. 基于计算机科学技术的设备智能检修系统设计[J]. 网络安全和信息化, 2023(10): 112-114.
- [5] 徐天宁. 基于大数据分析的医院检验设备运维检修系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(7): 133-135.
- [6] 马红星, 曹飞. 220 kV 智能变电站中的二次系统检修策略分析[J]. 电子技术, 2023, 52(6): 290-291.

- [7] 余锐, 钟璐, 陈柏汗, 等. 考虑关联故障率的电网稳定控制系统复合检修决策方法[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(4): 87-96.
- [8] 张辉. 基于电动汽车的充电系统故障检修策略研究[J]. 专用汽车, 2022(12): 74-77.
- [9] 蒋正虎, 段建成, 杨尚玉. 特殊区段的架空输电线路可靠性评估与检修决策方法分析[J]. 电工技术, 2021(1): 52-54.
- [10] 熊军, 王志超, 胡熊迪, 等. 基于互联网技术的配电自动化智能运维检修系统设计[J]. 物联网技术, 2022, 12(11): 77-79, 82.
- [11] 魏民. 110 kV 变电系统的运维风险与检修分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(11): 184-185.
- [12] 李奕旭, 季圣凯. 220 kV 变电系统的检修技术分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(11): 230-231.
- [13] 欧阳金鑫, 于莉, 蒋航, 等. 基于多层随机优化的电网安全稳定控制装置机会检修决策方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 144-151.
- [14] 和正强. 基于设备停运模型的电力系统状态检修技术研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(20): 100-103.
- [15] 赵准. 电力系统电气设备的检修技术分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(16): 182-184.

作者简介: 冯永青(1976—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 电力系统调度。