

# 基于检修价值评估的电网检修优化决策方法

王纯<sup>1</sup>, 乌鹏涛<sup>1</sup>, 郭斌<sup>1</sup>, 吕静<sup>1</sup>, 黄红伟<sup>2</sup>, 毛文照<sup>2</sup>

(1. 国网陕西省电力公司, 陕西 西安 710048; 2. 北京清大科越股份有限公司, 北京 100102)

**摘要:**为提升电网设备检修效益,提出了基于马尔科夫模型的设备检修价值评价指标,构建了一种基于检修价值评估的电网检修优化决策方法。综合考虑设备检修前后自身价值增幅和检修投入成本,提出了基于四状态马尔科夫模型的电网设备检修价值评价指标,并将其作为设备检修优先级的决策依据。按照检修价值排序,采用序列前向搜索算法开展电网设备检修优化。通过统计不同设备检修范围下电网运行风险、发电能力等关键指标的变化过程,确定检修设备范围及其检修计划。算例显示,当试探性优化所得的决策指标超过判定阈值时,优化决策方法将同时输出设备检修范围和检修计划。与传统方法对比结果表明:所提出的检修价值评价指标能全面考虑设备故障率和设备自身价值,有助于提升电网综合效益。

**关键词:**电网检修;设备检修价值;马尔科夫模型;序列前向搜索算法

**中图分类号:**TM743 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23852

## Power Grid Maintenance Optimization Decision Method Based on Maintenance Value Evaluation

WANG Chun<sup>1</sup>, WU Pengtao<sup>1</sup>, GUO Bin<sup>1</sup>, LÜ Jing<sup>1</sup>, HUANG Hongwei<sup>2</sup>, MAO Wenzhao<sup>2</sup>

(1. State Grid Shaanxi Electric Dispatch and Control Center, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Beijing 100102, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of power grid equipment maintenance, an evaluation index of equipment maintenance value based on Markov model was proposed, and an optimization decision method of power grid maintenance based on maintenance value evaluation was constructed. The value evaluation index of power grid equipment maintenance based on four-state Markov model was put forward by considering the increase of its own value and maintenance input cost before and after equipment maintenance. According to the order of maintenance value, a sequential forward search algorithm was used to optimize the maintenance of power grid equipment. By counting the change process of key indicators such as power grid operation risk and power generation capacity under different equipment maintenance scope, the scope of maintenance equipment and its maintenance plan were determined. The example shows that when the decision index obtained from the tentative optimization exceeds the decision threshold, the optimization decision method will output the maintenance range and maintenance plan of the equipment at the same time. Compared with the traditional method, the results show that the proposed maintenance value evaluation index can fully consider the equipment failure rate and its own value, which is helpful to improve the comprehensive benefits of the power grid.

**Key words:** power grid maintenance; equipment maintenance value; Markov model; sequence forward search algorithm

电网设备检修决策是电力系统运行方式安排的重要内容。设备检修的目的在于消除设备缺陷异常,避免故障跳闸损坏设备,保证电网安

全稳定运行。设备检修决策中不仅需要考虑设备运行工况,还需要考虑检修期间电网运行风险、电力可靠供应等要求,是一项复杂的优化决

**基金项目:**国家自然科学基金(51907035)

**作者简介:**王纯(1978—),男,硕士,高级工程师,Email:110382006@qq.com

策问题<sup>[1-2]</sup>。

根据决策内容的不同,电网设备检修决策包括两方面决策问题,分别为检修范围决策<sup>[3-4]</sup>和检修计划优化<sup>[5-6]</sup>。设备检修范围问题研究的关键在于提出设备检修任务重要性的评价指标,从而科学安排设备检修<sup>[7]</sup>。文献[8]研究了一种基于设备健康指数的故障率评估方法,构建了不同故障率水平的检修决策策略,优先安排高故障率设备检修。文献[9]研究了基于全生命周期理论的检修决策方法,以设备检修前后全生命周期价值增加值作为检修决策依据。文献[8-9]从不同的角度出发提出了设备检修范围的优化决策方法,但是未考虑以上设备检修对电网安全的影响,若安排不当,可能会降低电网运行安全性。检修计划优化问题本质上是一个以检修期间全网发电能力、电网风险、检修资源等为约束条件的优化问题,在给定的检修设备范围内制定最优检修方案。文献[10-11]研究了设备检修计划对电力供应能力的影响,提出了考虑电量执行的检修计划优化编制方法。文献[12]研究了设备检修计划所存在的设备风险和电网风险,提出了基于综合风险评估的检修协调优化方法。文献[13]研究了设备检修期间的风险重叠问题,提出了考虑风险重叠度最小的多电压等级检修协调方法。文献[10-13]提出了设备检修计划优化方法,能够最大限度降低设备检修对电网安全的影响,但是对设备自身可靠性考虑较少,可能造成关键设备检修时间滞后,影响设备安全的问题。

实际上,检修范围问题和检修计划优化是紧密耦合的两个问题,检修范围问题侧重于从设备自身工况出发,决策电网设备检修范围,以提升设备健康水平,避免异常缺陷对设备造成的影响;检修计划优化问题侧重于从电网运行需求出发,优化设备检修计划,以降低输变电设备检修对电网运行的影响。然而检修范围决策必须以电网运行承受能力为边界,充分考虑设备检修对运行风险、发电能力等产生的影响;同时,检修计划编制必须基于确定的设备检修范围开展。当前的研究往往聚焦于以上一方面问题,尚缺乏有效统筹检修范围决策和检修计划优化两方面问题的优化决策方法。

为此,本文将研究一种基于检修价值评估的电网检修优化决策方法。首先,构建了输变电设备四状态马尔科夫模型,考虑设备检修投入成本和检修前后设备自身价值增加,设计了基于四状

态马尔科夫模型的检修价值指标,作为设备检修重要性决策依据。接着,基于序列前向搜索算法,提出了内嵌检修计划优化的检修决策方法,在确定检修设备的同时形成检修计划。最后,基于IEEE-30节点系统构造算例,验证了所提出方法的有效性。

## 1 基于马尔科夫模型的设备检修价值评估

### 1.1 电网设备马尔科夫模型

马尔科夫过程常在电网设备可靠性评估中用于模拟设备在运行过程中逐渐劣化的过程<sup>[14-15]</sup>。目前我国电网企业现行的设备缺陷管理规范及标准中,一般将设备状态划分为正常、异常、严重、故障四个类型。为保持与现行行业规范的对应,本文将构建四状态马尔科夫模型,如图1所示。该模型中S0,S1,S2,S3依次对应输电设备正常、异常、严重、故障四个运行状态; $\lambda_{01}$ , $\lambda_{12}$ , $\lambda_{23}$ 分别为电网设备由正常状态转入异常状态、异常状态转入严重状态、严重状态转入故障状态的状态转移率; $u_{10}$ , $u_{20}$ , $u_{30}$ , $u_{21}$ 则是电网设备经过检修由异常状态恢复正常状态、严重状态恢复正常状态、故障状态恢复正常状态、严重状态缓解至异常状态的状态转移率; $\tau_{00}$ , $\tau_{11}$ , $\tau_{22}$ , $\tau_{33}$ 为电网设备维持在正常状态、异常状态、严重状态、故障状态下的概率。该模型要求电网设备状态劣化的过程必须是逐步渐进的,即必须依次历经正常、异常、严重、故障四个状态,不能跃变;而在设备检修修复过程中,可采用小修方式,使其由严重状态缓解至异常状态或异常状态恢复为正常状态,也可采用大修方式,使其由故障状态或严重状态直接恢复正常状态。

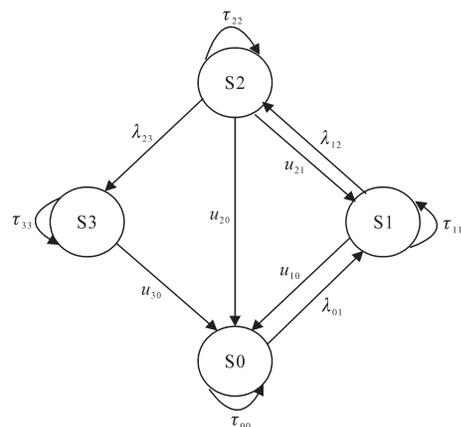


图1 电网设备四状态马尔科夫模型

Fig. 1 A four-state Markov model of power system equipment

根据上述马尔科夫过程,可得到电网设备状态转移矩阵。该矩阵用于反映输电设备由前一状态转向后一状态的转移概率,可表示为

$$M = \begin{bmatrix} \tau_{00} & \lambda_{01} & 0 & 0 \\ u_{10} & \tau_{11} & \lambda_{12} & 0 \\ u_{20} & u_{21} & \tau_{22} & \lambda_{23} \\ u_{30} & 0 & 0 & \tau_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $M$ 为电网设备状态转移矩阵,该矩阵中第*i*行第*j*列的元素代表输电设备由状态 $S_{i-1}$ 转为状态 $S_{j-1}$ 的发生概率。

状态转移矩阵应满足状态变化确定性原则,即每一行元素之和等于1,可表示为

$$\begin{cases} \tau_{00} + \lambda_{01} = 1 \\ u_{10} + \tau_{11} + \lambda_{12} = 1 \\ u_{20} + u_{21} + \tau_{22} + \lambda_{23} = 1 \\ u_{30} + \tau_{33} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,电网设备状态转移率 $\lambda_{01}, \lambda_{12}, \lambda_{23}$ 和检修修复率 $u_{10}, u_{20}, u_{30}, u_{21}$ 可由设备历史运行数据统计得到,文献[14]介绍了状态转移率、检修修复率的统计计算方法,并根据我国某省级电网实际数据测算了我国当前输电线路、变压器等关键设备的参数取值;而状态维持率则可根据式(2)所示的状态转移矩阵特性计算得到。

### 1.2 设备检修价值评估

电网设备检修的目的在于消除设备运行中产生的异常及缺陷,使其尽可能处于正常状态。从资产管理的角度来说,电网设备检修可视作通过投入人力、物力等资源要素,恢复设备自身价值的过程。因此,设备检修价值等效于设备检修前后自身价值的增加值与检修投入成本之差。在本文所提出的四状态马尔科夫模型中,设备检修价值可表示为

$$\begin{cases} V_e^{10} = V_e^{S0} - V_e^{S1} - C_e^{10} \\ V_e^{20} = V_e^{S0} - V_e^{S2} - C_e^{20} \\ V_e^{30} = V_e^{S0} - V_e^{S3} - C_e^{30} \\ V_e^{21} = V_e^{S1} - V_e^{S2} - C_e^{21} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_e^{10}, V_e^{20}, V_e^{30}, V_e^{21}$ 依次为电网设备*e*四状态马尔科夫模型中由异常状态至正常状态、由严重状态至正常状态、由故障状态至正常状态、由严重状态至异常状态所开展检修的设备检修价值; $C_e^{10}, C_e^{20}, C_e^{30}, C_e^{21}$ 依次为以上四项检修的综合成本; $V_e^{S0}, V_e^{S1}, V_e^{S2}, V_e^{S3}$ 依次为电网设备*e*处于正常、异常、严重、故障状态时的设备自身价值。

以上参数中,检修综合成本可通过电网设备检修综合评估分析计算得到,因此准确评估电网

设备检修价值的关键在于计算不同状态下的电网设备自身价值。

在电网设备马尔科夫模型中,若不考虑检修影响,电网设备从正常状态逐步过渡至故障状态的过程可视为自身价值流失的过程,而其状态转移概率可等效为自身价值在不同状态中转移的比例。其中,电网设备*e*正常状态下的自身价值 $V_e^{S0}$ 可通过电网设备建设成本等因素综合考虑确定<sup>[14-15]</sup>,则处于异常、严重、故障等状态的电网设备自身价值可表示为

$$\begin{cases} V_e^{S1} = \frac{\lambda_{01}}{\tau_{00} + \lambda_{01}} V_e^{S0} \\ V_e^{S2} = \frac{\lambda_{12}}{\tau_{11} + \lambda_{12}} V_e^{S1} \\ V_e^{S3} = \frac{\lambda_{23}}{\tau_{22} + \lambda_{23}} V_e^{S2} \end{cases} \quad (4)$$

## 2 基于序列前向算法的电网检修优化决策

设备检修价值是从设备自身出发,综合考虑设备检修前后自身价值变化和检修综合成本两方面因素,计算得到的检修价值量化标准。从提升设备可靠性角度出发,在进行检修决策时应考虑尽可能多地安排设备检修价值高的电网设备进行检修。然而设备检修可能造成用户停电、降低发电能力、提升运行风险等问题,为此,设备检修需求必须与电网运行承载能力相匹配。本节将在设备检修价值基础上,提出一种基于序列前向算法的电网检修决策方法,实现检修范围决策、检修计划优化两方面问题的统筹优化。

### 2.1 实施框架

序列前向搜索本质上是一种贪婪型搜索算法,主要用于在给定集合中筛选出最符合条件要求的子集<sup>[16-17]</sup>。如图2所示,本文所提出的基于序列前向搜索算法的电网设备检修决策方法整体上包括检修价值分析、试探性优化、决策调整三个阶段,其基本思路是根据电网设备运行状态,统计计算设备检修价值;按照检修价值由高到低的顺序,依次将其添加到待检修设备集合,进行检修计划优化编制,以确定电网运行承载能力范围内可开展检修的电网设备最大子集。

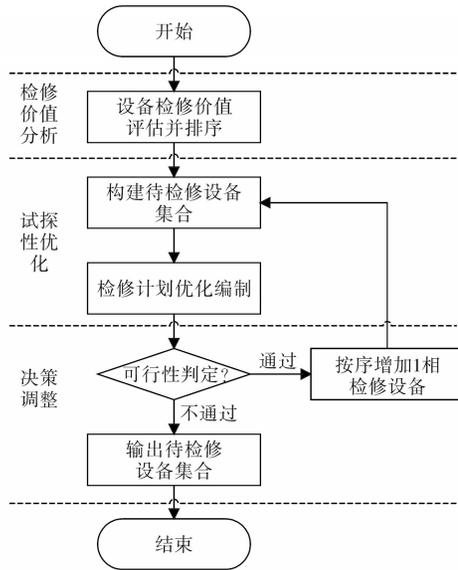


图2 电网检修优化决策流程

Fig. 2 Power grid maintenance optimization decision-making process

## 2.2 检修价值分析

检修价值分析的目的在于根据电网设备自身运行工况,确定其运行状态,并根据本文第1节所提出的评估方法计算设备检修价值指标。

根据设备当前状态可对其健康指数进行量化评分,按照国家电网公司颁布的《配网设备状态评价导则》,设备健康度评分取值范围为0~100。参考文献[8]的研究结果,设备当前故障率与其健康指数之间满足如下关系:

$$\lambda = Ke^{cH} \quad (5)$$

式中: $\lambda$ 、 $H$ 为设备故障率及其健康指数; $K$ 为比例系数; $C$ 为曲率系数。

文献[12]进一步介绍了当前不同类型电网设备故障率与状态间的关系,可表示为

$$S_e = \begin{cases} S0 & \lambda_e \leq \lambda_0^U \\ S1 & \lambda_0^U < \lambda_e \leq \lambda_1^U \\ S2 & \lambda_1^U < \lambda_e \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S_e$ 为电网设备 $e$ 的运行状态; $\lambda_e$ 为根据其健康指数计算得到的故障率; $\lambda_0^U$ 、 $\lambda_1^U$ 为其异常、严重状态故障率限值。

当设备故障率 $\lambda_e$ 低于异常状态故障率限值 $\lambda_0^U$ 时,该设备处于正常状态;若设备故障率 $\lambda_e$ 处于异常状态故障率限值 $\lambda_0^U$ 与严重状态故障率限值 $\lambda_1^U$ 之间,该设备处于异常状态;若设备故障率 $\lambda_e$ 超过严重状态故障率限值 $\lambda_1^U$ ,该设备处于严重状态。

根据以上运行状态分析,按照本文第1节所提出的设备检修价值评估方法,即可统计得到不

同设备的检修价值,在此基础上按照检修价值从大到小的顺序对其进行排序,该顺序即反映了电网设备检修工作的重要性。需要说明的是,对于同一设备,当其处于严重状态时,存在大修、小修两种检修方式,相应地将产生两个设备检修价值。为避免重复检修对电网安全运行的影响,检修价值分析中仅保留该设备检修价值高的检修方式<sup>[18-19]</sup>。

## 2.3 试探性优化

试探性优化的目的在于按照电网设备检修价值排序,依次选取部分电网设备构建待检修设备集合,并构建检修优化模型,统筹考虑检修任务资源投入能力等约束,对其优化分析,确定不同设备检修范围下的最优检修方案。该步骤的核心在于构建检修优化模型。不同运行要求下,电网设备检修优化模型不尽相同。考虑到当前我国各省区电网网架结构已比较坚强,设备检修期间电网运行风险可控性较高,而随着市场改革推进,发电计划与检修计划协调的矛盾日益突出,本文将提出一种以发电能力匹配性最高为目标电网设备检修优化模型。

为保证发电计划与检修计划有效衔接,发电能力匹配性最高优化目标可近似等效为优化周期内全网发电能力受限最小。该目标函数可表示为

$$\text{Min}F = \sum_{d=1}^{ND} P_d^{\text{lim}} \quad (7)$$

式中: $F$ 为优化目标; $ND$ 为优化周期天数; $P_d^{\text{lim}}$ 为第 $d$ 个运行日由于电网设备检修所产生发电能力受限容量。

发电能力受限容量为由于电网设备检修造成传输能力限制,机组最大发电能力与其装机容量之间的差值,可表示为

$$P_d^{\text{lim}} = \sum_{g \in G_d^{\text{UM}}} P_g^S - \sum_{g \in G_d^{\text{UM}}} P_g^{\text{Max}} \quad (8)$$

式中: $P_g^S$ 、 $P_g^{\text{Max}}$ 分别为发电机组装机容量及电网设备检修下最大发电能力, $G_d^{\text{UM}}$ 为第 $d$ 个运行日无检修计划的发电机组集合。

电网设备检修下发电机组最大发电能力可由离线分析计算得到,可参考文献[20]。

所需要考虑的约束条件包括运行风险约束、检修互斥性约束、发电能力约束、检修资源约束、检修时间约束、检修变量约束、检修连续性约束等<sup>[21]</sup>,可表示为

$$\begin{cases} u_{eq,d} \neq 1 \\ u_{eq1,d} \neq u_{eq2,d} \\ \sum_{g \in C^{in}} P_g^{Max} - P_d^C > P_d^R \\ \sum_{eq=1}^{N_{EQ}} u_{eq,d} R_{eq} \leq R_d^A \\ \sum_{d=1}^{N_D} u_{eq,d} = N_{eq}^D \\ u_{eq,d} - u_{eq,d-1} = u_{eq,d}^s - \mu_{eq,d}^e \\ \sum_{d=1}^{N_D} u_{eq,d}^s = 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $u_{eq,d}$ ,  $u_{eq,d}^s$ ,  $u_{eq,d}^e$  分别为电网设备  $eq$  第  $d$  个运行日检修状态变量、检修起始状态变量、检修结束状态变量;  $eq1, eq2$  为两个不同的待检修电网设备;  $N_{EQ}$  为待检修设备集合中设备数量;  $N_D$  为优化周期运行日天数;  $P_d^C$  为第  $d$  个运行日最大负荷;  $P_d^R$  为该运行日系统备用要求;  $R_{eq}$  为电网设备检修期间资源投入需求;  $R_d^A$  为第  $d$  个运行日全网检修资源投入能力;  $N_{eq}^D$  为电网设备  $eq$  检修工期。

### 2.4 决策调整

决策调整的目的在于根据试探性优化结果,对待检修设备集合是否需要调整进行判定。判定标准为原设备集合优化目标在判定阈值范围内,若新增一设备检修任务,则优化目标将超过阈值范围,该判定标准可表示为

$$\begin{cases} F_{EQ} \leq F^{set} \\ F_{EQ+1} > F^{set} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $F_{EQ}, F_{EQ+1}$  分别为原待检修设备集合  $EQ$  及新增 1 项设备检修所得待检修设备集合  $EQ+1$  优化所得的目标函数取值;  $F^{set}$  为根据运行需要设定的检修优化目标阈值。

若达到上述判定标准,则将原检修设备集合作为决策结果输出;否则按照设备检修价值排序新增 1 项检修任务,转入试探性优化,继续寻优。

## 3 算例分析

### 3.1 基础数据

本文将在 IEEE-30 节点系统基础上构造算例,以验证所提出方法的有效性。该系统中共有节点 30 个,输电线路 41 条,如图 3 所示。

输电线路四状态马尔科夫模型下关键参数如表 1 所示,其中输电设备状态转移率和检修修复率参考文献[14]的分析结果,实际应用中可参考其研究方法对历史数据统计分析测算得到,状

态维持率则参照式(2)计算得到。输电线路正常状态下的自身价值采用简化模型,将其视为与线路长度成正比的函数,其中自身价值最高的线路为 27-30,正常状态下自身价值达 27.6 亿元;自身价值最低的线路为 9-10,自身价值为 0.91 亿元。具体分布如图 4 所示。

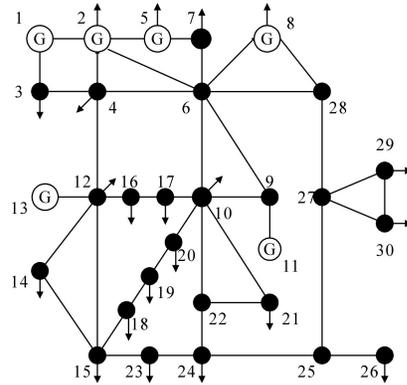


图 3 IEEE-30 节点系统

Fig. 3 IEEE-30 buses system

表 1 输电设备马尔科夫模型参数

Tab. 1 Markov parameters of transmission equipment

参数	取值/%	参数	取值/%	参数	取值/%
$\lambda_{01}$	10	$\tau_{00}$	90	$u_{10}$	60
$\lambda_{12}$	10	$\tau_{11}$	30	$u_{20}$	30
$\lambda_{23}$	10	$\tau_{22}$	30	$u_{30}$	30
		$\tau_{33}$	70	$u_{21}$	30

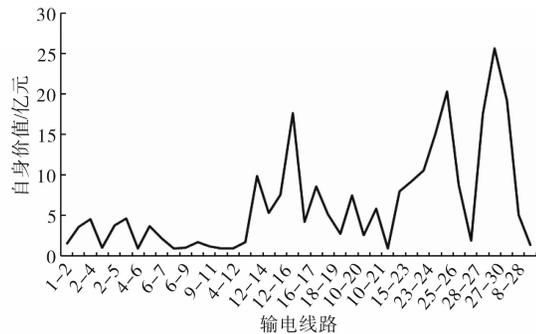


图 4 输电线路正常状态下自身价值

Fig. 4 Transmission lines' value under normal condition

### 3.2 数据分析

如表 2 所示,参照文献[8]所介绍的方法,通过现场检查确定输电线路健康指数,参照式(5)可计算得到不同输电线路的故障率,由此判定其运行状态。经统计,算例系统 41 条输电线路中共 10 条输电线路处于严重、异常状态,剩余线路均处于正常状态。

参照设备检修历史经验,规定处于严重状态输电线路大修、小修成本分别为 30 万元、15 万元,处于异常状态输电线路小修成本为 10 万元。

表2 输电线路参数

Tab.2 Parameters of transmission lines

线路	健康指数	故障率/%	状态	检修方式	检修成本/万元	检修价值/亿元
27-30	60	10	严重	大修	30	24.97
				小修	15	1.92
23-24	80	5	异常	小修	10	9.50
15-23	60	10	严重	大修	30	7.80
				小修	15	0.60
12-15	80	5	异常	小修	10	4.77
5-7	80	5	异常	小修	10	3.31
1-2	60	10	严重	大修	30	1.49
				小修	15	0.11
6-8	60	10	严重	大修	30	0.93
				小修	15	0.07
4-6	80	5	异常	小修	10	0.86
4-12	80	5	异常	小修	10	0.85
21-22	60	10	严重	大修	30	0.90
				小修	15	0.07

据此参照式(3)、式(4)可计算得到上述10条处于严重及异常状态下的输电线路不同检修方式下的检修价值。从表2中可以看出,对于处于严重状态的输电线路采用大修方式时,设备自身价值增量远高于小修方式,因此更适于采用大修方式,直接将其恢复至正常状态。因此,根据设备检修价值按照从高到低的次序,待检修的输电线路排序依次为:27-30,23-24,15-23,12-15,5-7,1-2,6-8,21-22,4-6,4-12。

根据电网运行方式分析,以上输电线路检修任务中,输电线路23-24,15-23检修具有互斥性,输电线路1-2,6-8,4-6,4-12对节点1,2,5,8处发电机组的发电能力有一定影响,最大发电能力受限容量分别为20 MW,30 MW,60 MW,80 MW。为保证电力有序供应,避免发电计划与检修计划不匹配而影响系统运行,规定全月发电能力受限阈值为700 MW。按照序列前向搜索算法,试探性优化及决策判定过程如图5所示。图5的横坐标为每轮试探型优化中新加入待检修设备集合的输电线路编号,纵坐标为按照式(7)~式(9)优化模型求解得到的发电能力受限量。可以看出,随着待检修设备集合增大,发电能力受限问题越发突出。输电线路4-6加入检修集合后,发电能力受限量已达到640 MW;若继续新增输电线路4-12,发电能力受限量将超过阈值700 MW,达到1120 MW,则对照式(10)的判定条件,次月检修设备为输电线路27-30,23-24,15-23,12-15,5-7,1-2,6-8,21-22,4-6,该设备检修集合下优化所得的检修计划即为次月检修计划。

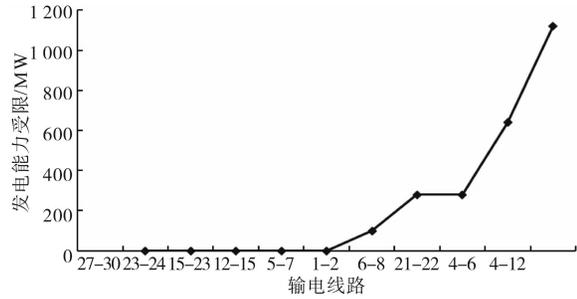


图5 试探性优化过程

Fig.5 Tentative optimization process

### 3.3 对比分析

与当前研究相比,本文所提出的优化决策方法能统筹考虑设备检修范围问题和检修计划编制问题,同时输出检修设备和检修计划。

此外,本文基于四状态马尔科夫模型,提出了设备检修价值评价指标,作为设备检修范围排序的参考标准。表3中对比了本文所提出方法、故障率排序<sup>[8]</sup>、全生命周期价值增量排序<sup>[9]</sup>三种方法下输电线路检修重要性排序结果。文献[8]所提出的基于故障率排序的检修范围决策方法中,设备将根据其故障率进行排序,排序结果仅与设备健康水平有关,未考虑设备自身价值差异;而文献[9]所提出的基于全生命周期价值增量排序的检修范围决策方法,将依据全生命周期价值理论优先将价值高的设备纳入检修范畴,而对设备故障率考虑较少。由式(3)~式(4)可知本文所提出的设备检修价值实际上综合考虑了故障率和设备价值两方面因素,严重、异常、正常等设备状态价值的计算过程既包括设备自身价值因素,也包括了设备在不同状态间状态转移发生概率。因此,本文所提出方法的排序结果介于故障率排序和全生命周期价值增量排序结果之间。

表3 输电线路检修重要性排序

Tab.3 Transmission line maintenance importance ranking

排序	本文	故障率	全生命周期价值增量
1	27-30	27-30	27-30
2	23-24	15-23	23-24
3	15-23	1-2	15-23
4	12-15	6-8	12-15
5	5-7	21-22	5-7
6	1-2	23-24	1-2
7	6-8	12-15	6-8
8	21-22	5-7	4-6
9	4-6	4-6	4-12
10	4-12	4-12	21-22

根据以上排序结果,在故障率排序下,处于严

重状态的输电线路将优先安排检修,将大幅降低设备故障跳闸风险,但是自身价值高但故障率低的输电线路可能存在检修安排滞后的问题。而全生命周期价值增量排序下,自身价值高的输电线路优先检修,增大了设备跳闸风险,也将导致电网运行风险增加。因此,相比于以上两种排序方式,本文所提出的设备检修价值评价指标能更加全面地考虑设备自身价值和健康状态两方面因素。

## 4 结论

为提升设备检修效益,促进检修范围决策、检修计划优化两个决策问题的有效衔接,提出了一种基于检修价值评估的电网检修优化决策方法。与故障率、全生命周期检修效益等指标相比,本文所提出的检修价值评价指标能够综合考虑故障率、检修投入成本、设备价值提升等因素。同时,该方法能够统筹考虑设备检修决策中的检修范围和检修计划两方面问题,更好地衔接电网安全和设备安全等检修决策要求。

### 参考文献

- [1] Wang C, Wang Z, Hou Y, *et al.* Dynamic game-based maintenance scheduling of integrated electric and natural gas grids with a bilevel approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 4958-4971.
- [2] 张蔷,李豹,卢明富,等.计及检修任务逻辑关联的电网设备检修优化方法[J].*电力学报*,2020,35(4):325-332,384. Zhang Qiang, Li Bao, Lu Mingfu, *et al.* Power grid equipment maintenance optimization method considering the maintenance task logic connection[J]. *Journal of Electric Power*, 2020, 35(4):325-332,384.
- [3] 楼贤嗣,马光,郭创新,等.电网运行全过程风险协调控制体系与架构设计[J].*电力系统自动化*,2020,44(5):161-170. Lou Xiansi, Ma Guang, Guo Chuangxin, *et al.* System and framework design of risk coordination control for whole operation process of power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(5):161-170.
- [4] Liu C, Zhang H, Xie Z, *et al.* Combined forecasting method of dissolved gases concentration and its application in condition-based maintenance[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(4): 1269-1279.
- [5] Wang Y, Li Z, Shahidehpour M, *et al.* Stochastic co-optimization of midterm and short-term maintenance outage scheduling considering covariates in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(6): 4795-4805.
- [6] 余佳莹,刘梓权.基于改进粒子群算法的输电网络检修计划优化[J].*广东电力*,2020,33(9):100-107. Yu Jiaying, Liu Ziquan. Optimization of transmission network maintenance schedule based on improved particle swarm algorithm[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(9):100-107.
- [7] Montanari G C, Hebner R, Seri P, *et al.* Self-assessment of health conditions of electrical assets and grid components: a contribution to smart grids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(2): 1206-1214.
- [8] 陈丽光,何绍洋,俞晓峰,等.考虑设备故障率时变特性的电网检修计划优化编制[J].*智慧电力*,2020,48(12):109-115. Chen Liguang, He Shaoyang, Yu Xiaofeng, *et al.* Optimal formulation for power grid maintenance scheduling considering time-varying characteristics of equipment failure rate[J]. *Smart Power*, 2020, 48(12):109-115.
- [9] 曾建鑫,郑小丽,杨冬梅,等.基于全生命周期理论的检修优化方法研究与实践[J].*电气自动化*,2018,40(6):116-118. Zeng Jianxin, Zheng Xiaoli, Yang Dongmei, *et al.* Research and practice of maintenance optimization method based on full life cycle theory[J]. *Electrical Automation*, 2018, 40(6): 116-118.
- [10] 许丹,罗治强,李旻,等.考虑安全约束及电量执行的年度发电与检修联合优化模型[J].*电力系统保护与控制*,2019,47(17):133-139. Xu Dan, Luo Zhiqiang, Li Min, *et al.* A combined optimization model for annual generation and maintenance scheduling considering safety constraints and power execution[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17):133-139.
- [11] 李豹,袁泉,张蔷,等.考虑发电能力匹配性的输变电设备检修优化方法[J].*电力大数据*,2020,23(5):46-53. Li Bao, Yuan Quan, Zhang Qiang, *et al.* Maintenance optimization method for power transmission and transformation equipment considering power generation capacity matching performance[J]. *Power Systems and Big Data*, 2020, 23(5):46-53.
- [12] 李碧君,崔晓丹,孙启明,等.基于综合风险的输变电设备月度检修计划协调优化方法[J].*智慧电力*,2018,46(4):57-62,69. Li Bijun, Cui Xiaodan, Sun Qiming, *et al.* Comprehensive risk based collaborative optimization of monthly maintenance schedule of electric power transmission and transformation equipment[J]. *Smart Power*, 2018, 46(4):57-62,69.
- [13] 陈浩,李莉,董新,等.考虑风险重叠度最小化的多电压等级检修计划协同优化[J].*电力系统保护与控制*,2019,47(15):93-101. Chen Hao, Li Li, Dong Xin, *et al.* Optimization of maintenance scheduling of multiple voltage level integrated with the risk overlap degree minimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15):93-101.
- [14] 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):2777-2786. 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):