

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181010

考虑风险重叠度最小化的多电压等级检修计划协同优化

陈浩¹, 李莉¹, 董新¹, 李晓琦¹, 李嫣然¹, 潘杰², 高峰¹

(1. 国网济南供电公司, 山东 济南 250012; 2. 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014)

摘要: 月度检修计划编制是电力调度机构的重点工作内容, 其合理与否直接影响电网的安全稳定运行。定义了检修计划“风险重叠度”的概念, 并提出了风险重叠度的量化方法。采用数据库技术索引查询停电设备影响对象集合, 考虑风险在各电压等级之间的传递, 将某一对象的各路电源的“危险指数”、“依存指数”作为依据, 判定多项检修工作同时开展期间是否发生风险重叠。将风险重叠度最小纳入检修计划协同优化的目标函数中, 结合损失电量最小、工作量均衡的目标以及各种约束条件, 采用人工鱼群算法求解检修计划优化问题。算例结果表明, 该方法能使检修计划的编制实现风险重叠度最小化, 并实现多电压等级检修计划的协同优化。

关键词: 检修计划; 风险重叠度; 优化问题; 人工鱼群

Optimization of maintenance scheduling of multiple voltage level integrated with the risk overlap degree minimization

CHEN Hao¹, LI Li¹, DONG Xin¹, LI Xiaoqi¹, LI Yanran¹, PAN Jie², GAO Feng¹

(1. State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China; 2. School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: The monthly maintenance scheduling is an important work for power dispatching institution. Its scientificity and reasonability directly affect the security of the power system. This paper defines the conception of the risk overlap and proposes the quantification method of the degree of risk overlap. The database index technology is used to find the set of objects affected by failure equipment. The transfer of the risk among objects with different voltage grades is also taken into consideration. On the basis of the failure index and dependency index of the sources of the object, the risk overlap can be judged when two or several works are carried out at the same time. The minimization of risk overlap is included in the objective function. The minimization of loss of power and equilibrium of workload are regarded as constraint conditions. The artificial fish-swarm algorithm is applied to optimize the maintenance scheduling. Experimental results show that the method in this paper can minimize the degree of risk overlap of the maintenance scheduling and realize the collaborative optimization with multi-voltage grade.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707111).

Key words: maintenance scheduling; risk overlap degree; optimization; artificial fish-swarm algorithm

0 引言

检修计划优化决策^[1-5], 是电力系统调度运行的结构性优化问题, 对电力系统的安全稳定运行具有重要的影响。大部分地区电网 220 kV 线路及以上母线检修计划由省级调度机构负责校核、编排, 220 kV 主变、110 kV 及以下检修计划由地市级调度机构根据自身检修需求、电网运行状况进行编制, 春检、

秋检期间月度检修申请多达几百条, 且各条停电申请由管辖范围不同的工区提出, 初始计划协同性差, 同一时间段内可能同时执行多项检修申请。如何科学合理地编排检修计划, 优化配置检修资源, 是电力生产实际中的一项重要工作内容。诸多研究成果将偏离到期检修时间最少、工作量分配最合理、停电范围最小为目标, 以潮流校核为安全性约束^[6-8], 优化检修计划的编制^[9-12]。但并没有文献指出, 两项检修工作同时进行会造成风险叠加, 叠加的影响并不能通过潮流校核获得。即忽略了对于个别变电

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707111)

站对象或某重要用户来说, 两项检修工作的同时开展是否存在失电风险重叠到同一对象的情况。若存在, 将导致某变电站或重要用户虽未停电却承受着比单个检修工作进行时大得多的失电风险水平。因此, 除满足检修计划优化^[13-14]的基本约束外, 月度停电计划在风险重叠程度上有很大的优化空间。本文原创性提出“风险重叠度”这一概念, 定义风险重叠度指标, 在检修计划优化过程中, 加入检修期间风险重叠度量这一环节, 考虑风险在不同电压等级间的传递, 在检修计划优化的目标函数中引入风险重叠度指标项, 结合检修计划编排的其他目标^[15-16]及各项约束条件^[17-20], 采用人工鱼群算法求解检修计划协同优化问题。与传统风险量化指标不同的是, 传统的电网风险指标通常定义为停电概率与后果的乘积, 目的在于量化电网运行期间某对象某方面的风险水平; 而本文提出的风险重叠度指标定义为: 某对象的各路电源危险程度或对各路电源依赖程度的变化量与损失负荷的乘积, 侧重于量化多项检修工作同时进行对同一对象的风险叠加程度。

1 风险重叠的定义

风险重叠是指, 同一时间段内存在两项或多项检修工作时, 至少有两项工作的风险叠加在同一对象上, 对象可以为某一电压等级的变电站, 或变电站内某主变或母线, 或某一用户。以表 1 中的三项检修申请为例进行说明, 图 1 给出某地级市局部电网结构图, 图 2 为三项申请相关的站内接线图。

表 1 工作时间段重合的三项停电申请

Table 1 Three maintenance applications coincided with working time

ID	停电设备	工作内容	停电时间	送电时间
001	220 kV 变电站 B	常规检修	4 月 3 日	4 月 5 日
	110 kV #1 母线			
002	线路 110_line1	消缺	4 月 4 日	4 月 4 日
003	220 kV 变电站 A #1	更换	4 月 3 日	4 月 5 日
	主变低压侧开关	CT		

三项工作单独进行时, 检修期间风险分析如下所述。

1) 申请 001 工作期间: 220 kV 变电站 B 110 kV #1 母线转检修, 该站 110 kV 系统所有元件由 110 kV #2 母线供电, 单母线供电时可靠性降低, 若 110 kV #2 母线掉闸, 将造成线路 110_line2 (110 kV 变电站 c 的进线电源 1) 停电。即 220 kV 变电站 B 110 kV #2 母线的停运风险将传递给 110 kV 变电站 c。

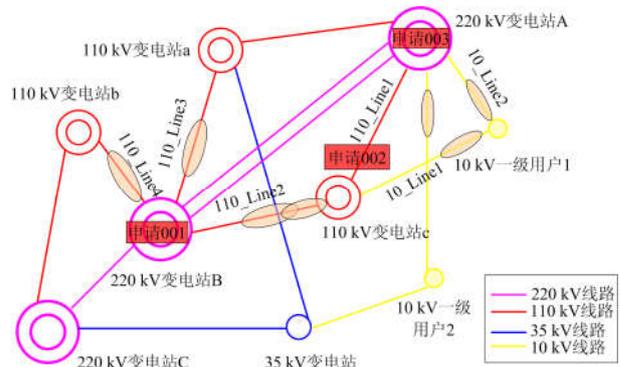


图 1 某地级市局部电网结构图

Fig. 1 Part of the power network of a city

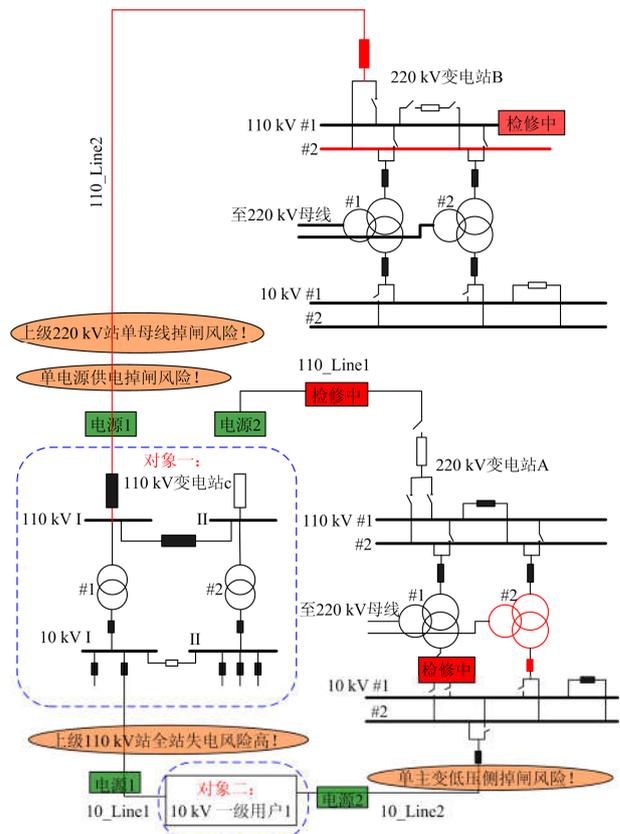


图 2 检修申请相关变电站站内接线图

Fig. 2 Main connection of the substations

2) 申请 002 工作期间: 线路 110_line1 转检修, 110 kV 变电站 c 全站负荷由线路 110_line2 单电源供电。若线路 110_line2 掉闸, 将造成 110 kV 变电站 c 全站失电。并造成下级 10 kV 一级用户 1 的进线电源 1 失电。

3) 申请 003 工作期间: 220 kV 变电站 A #1 主变低压侧开关转检修后, 220 kV 变电站 A 的 10 kV #1、#2 母线只能由 #2 主变供电。若 10 kV #1 母线、母联开关或 #2 主变低压侧开关掉闸, 将造成 10 kV

#2 母线停电,造成下级 10 kV 一级用户 1 的进线电源 2 失电。

三项工作同时进行时,检修期间风险分析如下:

1) 申请 001 与申请 002 同时进行时,该时间段内,110 kV 变电站 c 同时承受申请 001 与申请 002 两项风险,即 220 kV 变电站 B 110 kV #2 母线掉闸造成 110_line2 停电的风险,以及全站负荷由 110_line2 单电源供电的风险。因此申请 001 与申请 002 同时进行时,造成 110 kV 变电站 c 全站停电的风险水平大于两项申请单独进行时的风险水平。

2) 申请 001、申请 002、申请 003 同时进行时,该时间段内,因申请 001 和 002 造成 110 kV 变电站 c 全站停电风险水平升高因而 10 kV 一级用户 1 的进线电源 1 失电风险水平升高,风险由 110 kV 系统传递至 10 kV 系统;申请 003 又造成该用户电源 2 失电水平升高。因此申请 001、002、003 同时进行时,造成 10 kV 一级用户 1 停电风险水平大于申请单独进行时的风险水平。

3) 申请 001 与申请 003 同时进行时,该时间段内,申请 001 使 110 kV 变电站 c 进线电源 1 有失电风险,该风险也将传递给其 10 kV 一级用户 1。申请 003 使 10 kV 一级用户 1 进线电源 2 有停电风险。因而,申请 001、003 同时进行期间,110 kV 变电站 c 承受的停电风险水平与申请 001 单独进行时相同,而 10 kV 一级用户 1 所承受的停电风险比申请 003 单独进行时略高。

2 风险重叠度量化指标设计

2.1 定义停电设备影响对象的集合

将停电设备影响对象的集合定义为,因该设备停电,其他元件 $N-1$ (或同塔 $N-2$)故障导致风险上升的对象的集合。例如,220 kV 变电站 B 的 110 kV #1 母线的停电影响对象集合为:(110 kV 变电站 a, 110 kV 变电站 b, 110 kV 变电站 c, 10 kV 一级用户 1...),为便于索引和调用,本文采用关系型数据库 MYSQL 建立停电设备影响对象集合的数据表,格式如表 2 所示,该表中数据可来源于对调度 D5000 系统、PMS 系统数据的选择性导入及电网结构拓扑分析。表 3 为检修申请表结构。

表 2 停电设备数据表结构

字段名	数据类型	长度	键
停电设备 ID	VARCHAR	20	主键
检修申请 ID	INT(3)	20	外键
停电设备名称	VARCHAR	20	否
停电设备影响对象集合	SET	20	否

表 3 检修申请表结构

字段名	数据类型	长度	键
检修申请 ID	INT(3)	20	主键
申请停电时间 T_{start}	DATETIME		否
申请送电时间 T_{end}	DATETIME		否

2.2 定义对象的风险量化指数表

对停电设备影响集合中的每个对象构建对象表,可通过外键索引查找该对象的电源(进线线路)信息表和各电源的风险量化指数,表结构及表记录如表 4、表 5 所示。电源信息表结构如表 6。数据来源渠道与 2.1 节相同。

表 4 停电设备影响对象表的表结构

字段名	数据类型	长度	键
对象 ID	VARCHAR	20	主键
对象名称	VARCHAR	20	否
负载 P_i /MW	FLOAT		否
电源个数 num	TINYINT		否
电源集合 ID	VARCHAR	20	外键

表 5 对象的电源集合表结构

字段名	数据类型	长度	键
电源集合 ID	VARCHAR	20	主键
电源 ID	VARCHAR	20	外键
电源名称	VARCHAR	20	否

表 6 电源信息表结构

字段名	数据类型	长度	键
电源 ID	VARCHAR	20	主键
危险指数(FI)	FLOAT		否
依存指数(DI)	FLOAT		否

为量化检修工作期间的风险重叠度,首先定义风险分析对象的电源的危险指数(Failure Index, FI)和依存指数(Dependency Index, DI)两项指标。危险指数(FI)的计算公式由式(1)给出。

$$FI_{n,a}^{G_i} = P_{G_i,0} + \sum_{m \in A} P_{G_i,m} \quad (1)$$

式中: $FI_{n,a}^{G_i}$ 代表在编号为 a 的检修申请工作期间对象 n 的某一路电源 G_i 的危险指数; P 代表元件的停运概率; $P_{G_i,0}$ 代表正常运行状态下(不检修)电源 G_i 的停运概率,该数据从设备历史运行数据获得。 A 代表检修申请 a 工作开始(调整运行方式转移负荷,将设备转检修)后,承担转移过来的负荷的相关运行元件的集合。 $P_{G_i,m}$ 为检修期间可能发生 $N-1$ (或同塔

$N-2$)故障的元件的停运概率传递到电源 G_i 上的值, 由拓扑连接关系和历史停运率推算。

依存指数(DI)的计算公式由式(2)给出。

$$DI_{n,a}^{G_i} = 1/\text{num}_{n,a} \quad (2)$$

式(2)代表对象 n 对该电源 G_i 的依赖程度。若检修申请 a 工作期间, 电源对象 n 的 G_i 电源不可用(如转检修), 则在 MySQL 的数据表中将此 DI 指数值设为空值 NULL; 除此之外 DI 指数值由式(2)算出, 其中 $\text{num}_{n,a}$ 为检修申请 a 工作期间对象 n 可用的电源个数。

2.3 风险重叠度的量化指标

两个检修申请工作同时开展期间, 对于某一对象所承受的风险用重叠度来量化。对于月度停电计划的编排, 各检修申请的停电时间 T_{start} 为优化过程的自变量。整个月度计划的风险重叠度指标(Risk Overlapping Degree, ROD)定义为式(3)。

$$ROD = \sum_{n \in E} \omega_n \times \left\{ P_{n,L} \times \sum_{\substack{a,b \in M \\ a \neq b \\ p,q \in G \\ p \neq q}} t_{ab} \times [(FI_{n,a}^{G_p} - FI_{n,0}^{G_p}) \times (DI_{n,b}^{G_p} - DI_{n,0}^{G_p}) + \beta_n (FI_{n,a}^{G_p} - FI_{n,0}^{G_p}) \times (FI_{n,b}^{G_q} - FI_{n,0}^{G_q})] \right\} \quad (3)$$

$$E = E_1 \cup E_2 \cdots \cup E_e \quad (4)$$

以下对式(3)、式(4)中参数和各项的含义进行说明。

1) 式中, e 为当月检修申请的总个数, E_i 为检修申请 i 的停电设备影响对象的集合, 由 MySQL 数据表 2 和数据表 3 读取, E 为所有申请中停电设备影响对象集合取并集, n 为集合中一个对象, 如某电压等级的变电站或某低压用户; 集合 M 为当月检修申请组成的集合, a 、 b 的含义为申请 a 、申请 b ; 集合 G 为对象 n 的电源集合, 由 MySQL 数据表 5 读取, G_p 、 G_q 为其中两路进线电源。

2) 中括号中的第一项为申请 a 发生时电源 G_p 的危险指数($FI_{n,a}^{G_p}$)相对不检修时($FI_{n,0}^{G_p}$)的增加值, 乘以该电源的依存指数($DI_{n,b}^{G_p}$)在申请 b 发生时相对不检修时($DI_{n,0}^{G_p}$)的增加值。该项的含义为, 当申请 a 导致对象 n 的某一路电源的危险指数升高, 且申请 b 会导致对象 n 的同一路电源依存指数升高, 此时认为同时进行申请 a 和申请 b 对对象 n 造成的风险会发生叠加, 两项申请不建议同时安排。

3) 中括号中的第二项为申请 a 发生时电源 G_p 的危险指数($FI_{n,a}^{G_p}$)相对不检修时($FI_{n,0}^{G_p}$)的增加值, 乘以申请 b 发生时另一路电源 G_q 的危险指数($FI_{n,b}^{G_q}$)相对不检修时($FI_{n,0}^{G_q}$)的增加值。该项的含义为当申

请 a 导致对象 n 的某一路电源的危险指数升高, 且申请 b 会导致其另一路电源危险指数也升高时, 同样认为申请 a 、申请 b 同时进行时对对象 n 造成的风险发生了叠加, 两项申请不建议同时安排。乘以系数 β_n 的目的是使中括号中的第一项和第二项在数量级上相同, 适于相加运算, 这里 β_n 可取 10^3 。对象 n 各路电源的 FI、DI 指数根据检修申请工作内容, 由 MySQL 数据表 5、表 6 更新并读取。

4) t_{ab} 是检修申请 a 和申请 b 同时进行的持续时间, $P_{L,n}$ 为对象 n 的负荷值, 代表承担重叠风险的负荷量, 分别由 MySQL 数据表 3 和表 4 读取; ω_n 为对象 n 的重要性系数, 根据对象 n 的性质, ω_n 在表 7 中取值。

表 7 重要性系数 ω_n 取值表

对象属性	含一级用户	含二级用户	普通用户
220 kV	1	0.8	0.5
110 kV	0.8	0.5	0.3
35 kV	0.6	0.3	0.2
10 kV	0.5	0.2	0.1

表 7 为示例表, 表示对象电压等级越高、所带用户越重要, 其风险重叠度的评估值也越高, 优化过程将更有针对性。实际应用时可依据更多标准(如保电需求、负荷量等)进行更细致的分级估算。

3 考虑重叠度最小化的检修计划优化

检修计划的优化问题是一个以各检修申请的停电开始时间 x_i 为自变量的多约束整数规划问题, 当所得月度检修计划编排方案满足所有约束条件时, 称此月度计划是“可行的”, 而在诸多可行的方案中, 能使目标函数最优解的方案, 为是所求的最优方案。

3.1 检修计划优化问题的目标函数

3.1.1 目标一: 风险重叠度最小

本文在上述风险重叠度定义、计算的基础上, 将月度计划的风险重叠度指标 ROD(见式(3))引入检修计划优化的目标函数中, 将月度检修计划风险重叠度最小化作为计划编排的目标之一, 见式(5)。由于检修重叠度指标的定义中已经计及了检修期间其他运行元件 $N-1$ 停运概率、承担风险的负荷量、风险重叠时间等, 检修重叠度指标 ROD 已在很大程度上代表了整个检修期间电网的综合风险水平。

$$F_{\text{ROD}} = \text{ROD} \quad (5)$$

3.1.2 目标二: 检修造成停电损失负荷量最小

不同的检修顺序、多项工作单独或同时进行影响电网的运行方式, 不同时段负荷水平也不同, 将因检修造成的停电损失负荷量作为优化目标之一。

见式(6), 其中 P_i 为第 i 天全网因检修损失负荷量, N 为当月天数。

$$F_{\text{load}} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (6)$$

3.1.3 目标三: 日检修工作量方差最小

人工编制检修计划时常出现某一时段检修工作密集, 另一些时段检修工作特别少的情况, 造成检修资源分配不合理。为使工作均匀分配, 将工作量方差最小作为编排目标之一。见式(7), 其中 S_i 为第 i 天检修工作量, S_0 为月平均工作量。 S_i 计算公式见式(8), 其中 n_i 为当天安排的检修工作数目, $n_{\text{op},m}$ 为第 m 项工作操作次数, λ_k 为第 k 次操作的复杂系数, $T_{\text{op},k}$ 、 $P_{\text{op},k}$ 分别为花费时间和人力。

$$F_{\text{amount}} = \sum_{i=1}^N (S_i - S_0)^2 / N \quad (7)$$

$$S_i = \sum_{m=1}^{n_i} \left(\sum_{k=1}^{n_{\text{op},m}} \lambda_k \times T_{\text{op},k} \times P_{\text{op},k} \right) \quad (8)$$

综上, 考虑风险重叠度最小化检修计划协同优化的目标函数设为式(9), 其中 α 为各目标权重值。

$$F = \alpha_1 F_{\text{ROD}} + \alpha_2 F_{\text{load}} + \alpha_3 F_{\text{amount}} \quad (9)$$

3.2 检修计划优化问题的约束条件

检修计划约束条件总结如下。

1) 不可变更的检修申请时间约束。对于省调批复的高电压等级设备检修申请, 由于影响范围广, 必须按照省调批复时间停电。其他设备与之配合。用式(10)描述, 其中, x_i 为该设备停电开始时间, T_i 为省调批复的设备检修开始时间。

$$x_i = T_i \quad (10)$$

2) 检修工作的同时性约束。即“一停多用”原则, 使同一条线路或同一个节点失电的设备, 或同杆并架、施工互碍线路应同时检修, 用式(11)描述。 x_a 、 x_b 为两个须同时进行的申请的停电开始时间。

$$x_a = x_b \quad (11)$$

3) 检修工作的互斥性约束。同一变电站的两条母线、同一变电站的两台主变、同一变电站的两条进线、双电源用户的两条进线等, 这些设备不得同时检修, 避免造成不必要的停电。用式(12)描述。 t_{ab} 为该类申请的重叠时间。

$$t_{ab} = 0 \quad (12)$$

4) 安全校核约束。检修工作期间不得发生潮流越限和电压越限。用式(13)描述。 P_k 代表线路有功功率, $P_{k\text{max}}$ 为有功功率上限, U_k 为节点电压, $U_{k\text{max}}$ 和 $U_{k\text{min}}$ 分别为节点电压上下限。

$$\begin{aligned} P_k &< P_{k\text{max}} \\ U_{k\text{min}} &< U_k < U_{k\text{max}} \end{aligned} \quad (13)$$

以上约束条件在程序计算中采用罚函数的形式进行处理。

3.3 检修计划优化问题的算法

检修计划优化问题是一个组合优化问题, 优化解具有维数大、离散、非线性的特点, 利用智能优化算法可方便地引入各种约束条件。智能优化算法是一种通过迭代寻找全局最优解的算法, 常用智能优化算法有遗传算法、模拟退火法、禁忌搜索法、粒子群算法等。

人工鱼群算法^[15]是一种由动物行为演化而来的迭代寻优算法, 其原理为将欲寻优的变量集合视为人工鱼群, 将目标函数值等效为人工鱼当前所在位置的食物浓度, 设置人工鱼的最大移动步长、每次觅食最大试探次数的变量, 以鱼类群体的觅食、聚群、追尾、随机行为模拟问题的寻优过程。在解决检修计划优化问题时, 相比于遗传、禁忌搜索、模拟退火等算法, 人工鱼群算法涉及参数少、收敛性强, 且对问题的数学描述要求相对简单, 将一组解作为迭代的初始值, 可更方便地表示为利于启发式操作形式的数据结构。经综合考虑本文采用人工鱼群算法求解该检修优化问题, 具体过程如下。

1) 将当月计划中各检修申请的停电开始时间方案集合 $[x_1, x_2, \dots, x_{N_s}]$, 即一种编排方案等效为一片水域中的人工鱼, 设置感知距离 $v=50$, 最大移动步长 $step=10$, 拥挤度因子 $\delta=0.5$, 最大试探次数 $n_{\text{try}}=150$, 最大迭代次数 $n_{\text{Gen}}=150$ 。

2) 对种群进行初始化, 随机产生 N_f 条人工鱼, 即 N_f 个检修计划编排方案。计算初始种群中各人工鱼的食物浓度, 即目标函数 F 的值。

3) 比较各人工鱼的食物浓度大小, 记录 F 值最小的那条人工鱼, 视为最佳人工鱼, 存储其自变量和目标函数 F 的值。

4) 对每条人工鱼分别模拟聚群行为和追尾行为, 比较 F 值大小, 选择最优的行为执行。

5) 对各条人工鱼执行一次迭代, 将其目标函数 F 值与保存的最佳人工鱼的 F 值进行比较, 若比之值小, 则用当前的 F 值取代之, 否则最佳人工鱼维持原值。

6) 若当前已达最大迭代次数 n_{Gen} , 则输出最佳人工鱼的值(即目标函数 F 值和相应各自变量的取值), 获得考虑风险重叠度最小化的最优检修计划编排方案, 即各项检修申请的停电开始时间变量集合 $[x_1, x_2, \dots, x_{N_s}]$, 否则转到步骤 4)。

检修计划优化流程图 3。

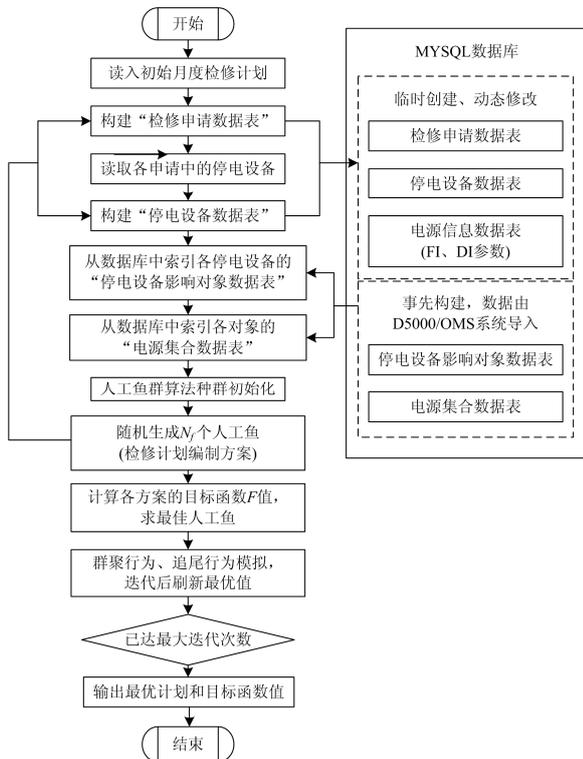


图 3 检修计划优化流程图

Fig. 3 Flow chart of maintenance schedule optimization

4 算例分析

本文采用山东省某地市供电公司各工区上报的 3 月份检修申请作为初始检修计划, 见表 8。以此为算例, 进行考虑风险重叠度最小化的多电压等级检修计划协同优化。

采用本文方法对表 8 中的初始计划进行优化后, 设定人工鱼种群大小为 20。目标函数 F 的三个权重系数分别取 $\alpha_1 = 0.5$ 、 $\alpha_2 = 0.3$ 、 $\alpha_3 = 0.2$, 以风险重叠度指标 ROD 为优化重点。人工鱼群算法所得最优方案结果见表 9。

优化后, 申请 001 和 006 主变轮停期间该站有全站停电风险, 优化结果中此期间不安排申请 009、011、013, 避免河新站三路电源中一路电源危险指数和依存指数同时升高。申请 009 和申请 011 停电影响范围相同, 将其安排在同一时间开始。因贤新线也属河新站其中一路电源, 优化结果中申请 013 与 009 和 011 错开。同样, 函玉站一路电源姚函线危险指数在申请 001 和 006 期间升高, 函玉站另一路电源隆英线相关元件的检修工作, 即申请 004 不在此期间安排。中飞线所带用户为一级用户, 该用户另一路电源来自仓韩站 110 kV 母线出线, 优化结果中申请 003、005 不同时安排。农潘站和山团站同

表 8 山东省某供电公司 3 月初始检修计划

Table 8 Example of original maintenance schedule on March

ID	所属变电站	停电设备	检修时段
001	姚家站	#1 主变	3 月 2 日—3 月 4 日
002	—	110 kV 美彩线	3 月 8 日—3 月 11 日
003	仓韩站	110 kV#1 母线	3 月 22 日—3 月 23 日
004	隆兴站	隆英线出线开关	3 月 3 日—3 月 3 日
005	索中站	中飞线出线开关	3 月 23 日—3 月 24 日
006	姚家站	#2 主变	3 月 5 日—3 月 7 日
007	—	经市线	3 月 12 日—3 月 15 日
008	郊南站	220 kV 母联开关	3 月 15 日—3 月 18 日
009	—	110 kV 贤姚线	3 月 5 日—3 月 6 日
010	—	10 kV 经车线	3 月 17 日—3 月 19 日
011	文贤站	贤姚线出线开关	3 月 6 日—3 月 10 日
012	—	10 kV 玉灯线	3 月 21 日—3 月 23 日
013	文贤站	贤新线	3 月 8 日—3 月 12 日
014	—	220 kV 美清线	3 月 25 日—3 月 26 日
015	济车站	220 kV#1 母线	3 月 25 日—3 月 28 日
016	农潘站	35 kV 农水线	3 月 19 日—3 月 21 日
017	山团站	#1 主变	3 月 19 日—3 月 21 日
018	—	10 kV 堤平 I 线	3 月 3 日—3 月 5 日
019	套贺站	10 kV I 段母线	3 月 8 日—3 月 11 日
020	神武站	110 kV I 母线#1 主变	3 月 10 日—3 月 15 日
021	—	35 kV 质检 II 线	3 月 20 日—3 月 23 日
022	—	35 kV 质检 I 线	3 月 29 日—3 月 30 日
023	—	110 kV 志韩线	3 月 11 日—3 月 13 日
024	—	110 kV 义邢线	3 月 22 日—3 月 23 日
025	—	10 kV 义体线	3 月 7 日—3 月 10 日
026	—	10 kV 奥中 I 线	3 月 6 日—3 月 8 日
027	—	10 kV 虹田线	3 月 9 日—3 月 12 日
028	—	10 kV 孟化线	3 月 16 日—3 月 17 日

时单主变运行时, 会导致两路电源分别来自这两个站的二级用户某化工厂两路电源危险指数同时升高, 因而结果中将申请 016 和 017 错开。220 kV 美清线工作时, 美里站有全站停电风险, 而一级用户站济车站的一路电源点来自美里站, 为防止该用户风险叠加, 申请 014 与 015 不同时安排。申请 008 工作期间, 220 kV 郊南站有全站停电风险, 导致两路电源都来自郊南站的 110 kV 七经路站也有全站停电风险, 某一级用户的两路电源 10 kV 经车线和 10 kV 经市线都出自七经路站, 因此结果中申请 007 与 010 不同时安排并且都与申请 008 错开, 考虑到了风险在不同电压等级之间的传递。由于 10 kV 玉灯线与经车线是同沟电缆线路, 因此结果中安排申请 010、012 同时进行。结果中的其他优化项及细节

不再赘述。

表 9 中的优化结果在满足各约束条件的前提下,以最大程度得降低风险重叠度为目标,同时降低检修工作损失负荷量、尽量均衡单日工作量。表 10 给出优化前后目标函数值的对比。

表 9 优化结果

Table 9 Optimizing result

ID	所属变电站	停电设备	检修时段
001	姚家站	#1 主变	3月2日—3月4日
002	—	110 kV 美彩线	3月8日—3月11日
003	仓韩站	110 kV#1 母线	3月21日—3月22日
004	隆兴站	隆英线出线开关	3月1日—3月1日
005	索中站	中飞线出线开关	3月23日—3月24日
006	姚家站	#2 主变	3月5日—3月7日
007	—	经市线	3月10日—3月13日
008	郊南站	220 kV 母联开关	3月15日—3月18日
009	—	110 kV 贤姚线	3月8日—3月9日
010	—	10 kV 经车线	3月19日—3月21日
011	文贤站	贤姚线出线开关	3月8日—3月12日
012	—	10 kV 玉灯线	3月19日—3月21日
013	—	贤新线	3月10日—3月14日
014	—	220 kV 美清线	3月25日—3月26日
015	济车站	220 kV #1 母线	3月29日—3月31日
016	农潘站	#2 主变	3月19日—3月21日
017	山团站	#1 主变	3月22日—3月24日
018	—	10 kV 堤平 I 线	3月3日—3月5日
019	套贺站	10 kV I 段母线	3月8日—3月11日
020	神武站	110 kV I 母线#1 主变	3月10日—3月15日
021	—	35 kV 质检 II 线	3月19日—3月22日
022	—	35 kV 质检 I 线	3月30日—3月31日
023	—	110 kV 志韩线	3月7日—3月9日
024	—	110 kV 义邢线	3月23日—3月24日
025	—	10 kV 义体线	3月10日—3月13日
026	—	10 kV 奥中 I 线	3月18日—3月20日
027	—	10 kV 虹田线	3月10日—3月13日
028	—	10 kV 孟化线	3月7日—3月8日

表 10 优化前后目标函数值对比

Table 10 Comparison of objective function before and after optimizing

目标函数	F_{ROD}	F_{load}	F_{amount}	F
目标权重	0.5	0.3	0.2	—
优化前	35.71	55.32	20.62	38.575
优化后	1.02	48.54	14.90	18.052
改善程度	97.14%	12.26%	27.74%	51.99%

为验证检修计划优化前后重叠停电的改善情况,通过逐条梳理分析风险的方式,对本算例计划中的重叠停电率进行对比,重叠停电率计算公式见式(14)所示。其中, $P_{overlap}$ 为重叠停电率,代表停电计划中发生风险叠加的比例, $N_{overlap}$ 为停电计划中发生风险叠加的工作条数, N_s 为停电计划中工作总条数。

$$P_{overlap} = \frac{N_{overlap}}{N_s} \times 100\% \quad (14)$$

为验证本文算法结果对电网风险的改善情况,用风险量化指标衡量整月的风险水平,系统停电电量风险指标^[16](System energy not supplied, SENS)计算式如(15)所示,停电损失费用风险指标^[16](System interruption cost, SIC)如式(16)所示。

$$SENS = \sum_{k=1}^{N_{node}} \omega_k \times \left(\sum_{i=1}^{N_Y} P_{sequence} \times W_{i,k} \right) \quad (15)$$

$$SIC = \sum_{k=1}^{N_{node}} \omega_k \times \left(\sum_{i=1}^{N_Y} P_{sequence} \times C_{i,k} \right) \quad (16)$$

式中: N_{node} 为电网节点个数; ω_k 为节点 k 的重要性权重; N_Y 为故障序列个数; $P_{sequence}$ 为故障序列发生概率; $W_{i,k}$ 为节点 k 的停电损失电量; $C_{i,k}$ 为节点 k 失电停电损失费用。

通过对停电计划的梳理校核以及风险指标计算,表 11 给出采用本文算法优化前后,用重叠停电率衡量风险重叠情况的对比结果。

表 11 优化前后其他指标的对比结果

Table 11 Comparison of other indexes before and after optimizing

评价指标	优化前	优化后	改善
重叠停电率 $P_{overlap}$	35.7	7.1	80.1%
系统停电电量风险指标 SENS	0.856	0.391	54.3%
停电损失费用风险指标 SIC	0.098	0.025	75.5%

图 4 给出了目标函数中 F_{amount} 的权重 $\alpha_{amount}=0.2$ (固定不变), F_{ROD} 的权重 α_{ROD} 从 0 变化至 0.8(对应 α_{load} 从 0.8 变化至 0)过程中表 11 中的三项评估指标变化情况。可根据实际需要权衡两项权重的取值。图 5 给出了 $\alpha_{amount}=0.2、0.4、0.6$ 三种情形下每天工作量的分布情况,可以看出三种情况中当 α_{amount} 取值为 0.6 时,日工作量分布较均衡。

由以上结果可知,采用本文提出的风险重叠度指标并将其作为优化目标,兼顾不同电压等级工作之间的互相影响,实现多电压等级检修工作的协同优化,能最大程度降低各检修工作间对同一对象的风险重叠,降低检修期间用户电量损失、费用损失风险水平,提高对重要用户的供电可靠性。

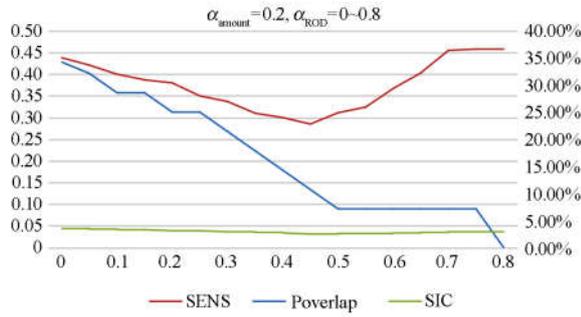


图 4 权重变化时各项指标变化曲线
Fig. 4 Curve of indexes with weight variation

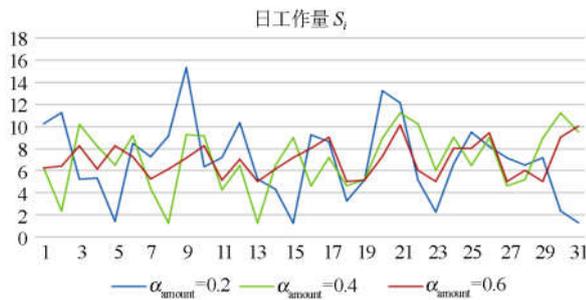


图 5 α_{amount} 变化时日工作量分布情况
Fig. 5 Curve of daily workload with α_{amount}

5 结论

本文提出了考虑风险重叠度最小化的多电压等级检修计划协同优化策略。原创性地提出风险重叠度的概念，定义检修计划集的风险重叠度指标，并将其作为检修计划优化问题中的重点优化目标，采用人工鱼群算法求解多目标多约束问题。本文以某供电公司某初始月度计划为算例，验证了以风险重叠度指标衡量检修期间某对象所承受风险大小的有效性。算例结果表明，以风险重叠度为目标优化月度停电计划，能够全面考量各项检修工作的影响范围、影响对象，兼顾风险在不同电压等级之间的传递，实现各电压等级工作协同优化，避免检修期间风险叠加导致变电站失电风险上升，或重要用户供电可靠性降低。

本文风险重叠度指标可应用于不同周期的检修计划，如年计划、周计划等，还可进一步探究风险重叠度校核在检修计划管理系统中的功能开发及应用。

参考文献

[1] ELSHARKH M Y, EIKEIB A A. Maintenance scheduling of generation and transmission systems using fuzzy

evolutionary programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 862-866.

[2] 丁明, 冯永青. 发输电设备联合检修模型及算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (5): 18-23.

DING Ming, FENG Yongqing. Research on the modeling and algorithm to global generator and transmission maintenance scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 18-23.

[3] FU Y, SHAHIDEHPOUR M, LI Z. Security-constrained optimal coordination of generation and transmission maintenance outage scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1302-1313.

[4] 方陈, 夏清, 胡朝阳, 等. 月度发输电检修一体化优化力法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 50-54.

FANG Chen, XIA Qing, HU Zhaoyang, et al. Integrated generation and transmission monthly maintenance scheduling method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 50-54.

[5] MARWALI M K C, SHAHIDEHPOUR S M. Integrated generation transmission maintenance scheduling with network constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3): 1063-1068.

[6] 崔珊珊, 张建华, 刘文霞. 复合遗传混合智能算法在配电网检修时间优化中的应用[J]. 现代电力, 2010, 27(1): 22-25.

CUI Shanshan, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia. Application of hybrid intelligent algorithm mixed with complex method and genetic algorithm to distribution device maintenance scheduling[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(1): 22-25.

[7] 刘文颖, 谢昶, 文昌, 等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 141-148.

LIU Wenyong, XIE Chang, WEN Jing, et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on Niche multi-objective particle swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 141-148.

[8] 黄江倩, 赵舫, 程伟华, 等. 基于风险管理方法的配网检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 94-100.

HUANG Jiangqian, ZHAO Fang, CHENG Weihua, et al. Optimization of distribution network maintenance plan based on risk management method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 94-100.

- [9] 鲍冠南, 张健, 袁森, 等. 基于重叠度的发输变电设备重叠停电判定策略[J]. 山东电力技术, 2015, 42(7): 36-40.
BAO Guannan, ZHANG Jian, YUAN Sen, et al. An overlap-outage judging strategy of generation and transmission facilities based on overlap-degree-index[J]. Shandong Electric Power, 2015, 42(7): 36-40.
- [10] 杨帆, 高强, 林焯, 等. 电网停电计划编排自学习专家库研究[J]. 电工技术, 2019, 13(1): 45-49.
YANG Fan, GAO Qiang, LIN Ye, et al. Research on self-learning expert database of power cut scheme scheduling[J]. Electric Engineering, 2019, 13(1): 45-49.
- [11] 周明, 夏澍, 李琰, 等. 含风电的电力系统月度机组组合和检修计划联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1586-1595.
ZHOU Ming, XIA Shu, LI Yan, et al. A joint optimization approach on monthly unit commitment and maintenance scheduling for wind power integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1586-1595.
- [12] 肖辅盛, 高适, 邓超志, 等. 一种基于检修风险收益的输变电设备检修优先级排序方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 110-116.
XIAO Fusheng, GAO Shi, DENG Chaozhi, et al. Maintenance prioritization method of transmission and transformation equipment based on maintenance risk return[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 110-116.
- [13] 蔡帜, 罗治强, 杨军峰, 等. 考虑大规模可再生能源接入的输电设备检修计划[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 96-101.
CAI Zhi, LUO Zhiqiang, YANG Junfeng, et al. Transmission maintenance scheduling with large-scale renewable energy integration[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 96-101.
- [14] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fangfang, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [15] 徐鹏, 刘文颖, 赵子兰, 等. 基于改进人工鱼群算法的含大规模风电电网无功优化[J]. 中国电力, 2013, 46(11): 8-11.
XU Peng, LIU Wenyong, ZHAO Zilan, et al. Reactive voltage optimization of a complex power grid integrated with large-scale wind power by improve artificial fish swarm algorithm(AFSA)[J]. Electric Power, 2013, 46(11): 8-11.
- [16] 董新, 张波, 潘志远. 改进状态抽样法及其在含微网的配电网风险评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 39-46.
DONG Xin, ZHANG Bo, PAN Zhiyuan. Improved state sampling method applied in the risk assessment of distribution network with configuration of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 39-46.
- [17] 闫秉科, 李小平, 舒欣, 等. 多种分布式电源随机性的配电网优化运行研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 14-17.
YAN Bingke, LI Xiaoping, SHU Xin, et al. Research on optimal operation of distribution network considering stochastic nature of different distributed generations[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 14-17.
- [18] 陈炜, 张锐, 杜娜, 等. 基于 RDA 的需求侧均衡调度策略研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 26-30.
CHEN Wei, ZHANG Rui, DU Na, et al. Study on demand side equilibrium dispatching strategy based on replicator dynamics algorithm[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 26-30.
- [19] 余文辉, 王凯琳, 高松川. 供电可靠性关键指标分析方法及应用[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 121-125.
YU Wenhui, WANG Kailin, GAO Songchuan. Analysis method for critical indicators of power supply reliability and its application[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7): 121-125.
- [20] 王敏, 许建, 潘永春. 计及风电预测可靠性的含风电电力系统优化调度模型[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 44-47.
WANG Min, XU Jian, PAN Yongchun. Optimized dispatching model for power system with wind power considering wind power forecasting reliability[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 44-47.

收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2018-10-20

作者简介:

潘杰(1982—), 男, 博士, 通信作者, 研究方向为电力系统稳定控制和放电等离子体及其应用。E-mail: sdnupanjie@163.com

(编辑 姜新丽)