

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181518

考虑人因风险的电力调度值班操作任务分配方法

陈碧云¹, 李欣桐¹, 李滨¹, 丁晋²

(1. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004;
2. 国网四川省电力公司泸州供电公司, 四川 泸州 646000)

摘要: 电力调度员操作的正确性对电网的安全可靠运行具有重要影响, 它主要与调度员的工作经验、责任心以及历史操作正确率等非实时因素以及调度员工作时长、当值班次以及心理状态等实时因素密切相关。对影响调度操作正确性的人为因素进行建模, 考虑不同班次工作量的合理分配, 并以日调度操作总人因风险最小为目标, 应用细菌群体趋药性算法对日电网调度任务进行优化分配。以某电网的实际调度工作任务为例进行分析, 分配结果在保证各班次工作量均衡的同时满足了总人因风险值最小, 验证了所提模型与方法的有效性。

关键词: 电力调度; 人因风险; 工作量; 细菌群体趋药性算法; 优化分配

Assignment method of power dispatching tasks considering human risk

CHEN Biyun¹, LI Xintong¹, LI Bin¹, DING Jin²

(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company Luzhou Power Supply Company, Luzhou 646000, China)

Abstract: The correctness of operation of power dispatcher has an important impact on the safe and reliable operation of power grid, which is closely related to non-real-time factors such as dispatcher's work experience, sense of responsibility and historical operational accuracy, as well as real-time factors such as dispatcher's working hours, on-duty shifts and psychological state. This paper models the human factors influencing the accuracy of dispatching operation, takes the reasonable distribution of workload of different shifts into account, aims at minimizing the total human risk, and uses bacterial colony chemotaxis algorithm to optimize the allocation of daily power grid dispatching tasks. Taking the actual dispatching tasks of a certain power network as an analyzing example, the allocation result ensures that the workload of each shift is balanced while the total human risk value is minimized, which verifies the effectiveness of the proposed model and method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51767002).

Key words: power dispatching; human risk; workload; bacterial colony chemotaxis algorithm; optimizing assignment

0 引言

当前, 在科技的驱动下, 电力系统向着网络化、规模化、技术化发展, 电力系统的变化强化了其复杂性, 使电力调度工作难度增加。电力系统自动化水平的提高, 先进的设备和技术对电网调度操作的可靠性提供了有力保障。据统计, 国内外电力行业每年因人为失误造成的事故率高达 70%~80%^[1]。电力调度员作为电力调度运行和操作的重要参与者, 其操作的准确性直接影响电力系统的安全稳定运行,

预防人为失误可切实降低潜在风险, 减少系统受到的危害, 对于切实强化电力调度运行的可靠性, 推动电力行业的稳定、持续发展具有重要意义^[2]。

目前在电力系统中, 对人为失误的分析大多在定性分析基础上加入了定量分析, 使其更为直观。如文献[3]改进了 HRA 中的认知可靠性与误差分析方法(CREAM), 将其运用于电力系统中, 通过 9 类 CPC 指标分析电力系统的人为可靠性; 文献[4]在计及人为因素对设备可靠性影响的基础上, 考虑不同的任务场景提出了基于比例故障模型的电力设备可靠性评估方法; 文献[5]分析了电网操作人因失误机理和影响因素, 基于各因素的重要度建立多级因素

集, 提出了基于模糊综合评判的人因可靠性定量分析方法, 通过具体数值以量化电网操作人因可靠性; 文献[6]分析了传统 CREAM 法的不足, 充分考虑各因子间的权重关系, 建立了基于贝叶斯网络的改进 CREAM 法, 并将其引入核电厂主控室人机界面人因可靠性评估中, 对数字化人机界面的人因可靠性研究具有一定的指导意义; 文献[7]分析了变电站运行操作、设备检修操作以及调度操作的人因可靠性, 设计了电力系统人因数据库系统, 为电力系统的人因可靠性分析提供数据支撑, 并给出了运用数据挖掘技术等方法对历史数据进行深度提炼分析的思路。

在执行调度操作任务时, 工作量是影响电力调度员工作效率及准确性的重要因素, 合理的工作量预判能够使值班调度员维持良好的工作状态^[8]。本文建立了调度操作任务的非实时因素和实时因素模型, 对操作人因风险和工作量进行量化, 预先对次日调度工作进行工作量和风险水平分析, 采用细菌群体趋药性算法(BCC), 在满足工作量平衡的前提下以调度操作人因风险值最小为优化目标调整调度工作安排, 实现日前调度^[9], 最后以实际电网调度任务验证所提方法的有效性。

1 调度操作工作量

电力调度工作的执行过程为: 电厂、电站等操作单位向上级调度中心请示, 提交工作申请, 经上级调度中心方式部门批准安排检修单后交予调度部门执行处理^[10]。因此, 调度工作的申请、安排与执行环节具有开环性, 若工作安排环节缺乏合理性, 可能导致工作量失衡, 降低调度员的工作效率, 增加操作风险。

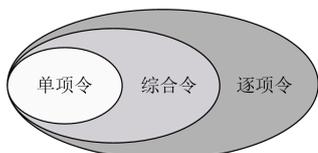


图 1 调度令关系图

Fig. 1 Relationship between dispatching orders

电力调度工作的调度令主要形式包括单项令、综合令和逐项令。单项令主要指调度员拟定并下达的只包含单项操作的调度令; 综合令主要指发令人必须说明操作的任务、要求、操作对象的始状态和最终状态的调度令, 具体操作步骤和顺序可由受令人拟定, 一般地, 仅涉及一个厂站的操作任务适用综合令; 逐项令主要指调度员根据操作任务之间的逻辑关系, 按照指定顺序拟定并下达的单项令或综

合令。三者的关系如图 1 所示。

操作类型可具体量化为

$$s = s_1 + 0.8s_2 + 1.2s_3 \quad (1)$$

式中: s_1 为该项调度操作中包含的单项令数; s_2 为该项调度操作中包含的综合令分解后对应的单项令数; s_3 为该项调度操作中包含的逐项令分解后对应的单项令数^[8]。

调度操作工作量的多少可用工作耗时及操作类型来衡量, 计算表达式为

$$f_{wt} = s_0 \cdot st \quad (2)$$

式中: t 为执行该项任务的操作时间, 以 min 计; s_0 为操作类型基准值。

2 调度操作人因风险值分析建模

调度操作人因风险的影响因素可分为非实时因素和实时因素两大类, 前者主要包括技能水平、责任心等历史数据, 后者主要包括连续工作时长、心理因素等反映调度员实时工作状态的数据^[11-12]。参考文献[3]中人因可靠性的 9 类 CPC 指标, 本文提出的调度操作人因风险影响因素如图 2 所示。

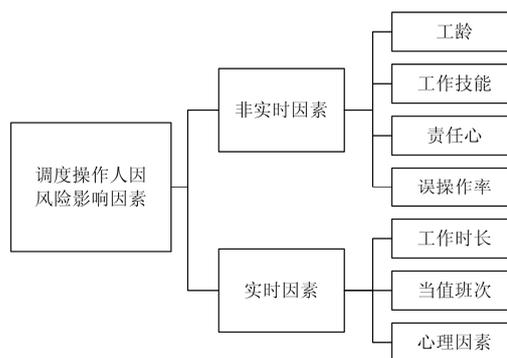


图 2 调度操作人因风险影响因素集

Fig. 2 Influencing factor set of power dispatching human risk

2.1 非实时因素分析建模

非实时因素主要通过查阅员工档案或电网年终考核结果获取相关数据, 以反映调度员的工作能力以及工作熟练程度, 主要包括以下指标。

(1) 工齡: 调度员的工作经验可通过调度员从事调度工作的工齡反映, 以变量 E 表示。

(2) 工作技能: 表示调度员的技能水平, 即调度员对操作的熟练程度, 以变量 T 表示。

(3) 责任心: 表示了调度员对日常调度工作的责任心, 一般可通过年终考核等数据统计得出, 以变量 R 表示。

(4) 误操作率: 表示调度员从事调度工作至今的工作失误差, 以变量 E_r 表示, 计算方法如式(3)所示。

$$E_r = \frac{N}{E} \quad (3)$$

式中, N 为该调度员从事工作至今出现工作失误的次数。在非实时因素的四项指标中, 误操作率的重要性高于其他三项指标, 反映了调度员在实际操作时的准确性。

考虑到一般情况下调度员工作年限增加其技能水平逐渐提升, 即工作技能与其工龄一般具有同增趋势, 即因此两者之间的联系以乘积形式拟合, 其余指标通过叠加形式反映^[13]。

对工作技能、责任心两个变量采用 0.1~0.9 表示其程度, 其取值可表示如下^[10]。

(1) 工作技能可分为熟练、一般、不熟练三个程度, 其中熟练取值为 1.0, 一般取值为 0.6, 不熟练取值为 0.2。

(2) 责任心可分为较强、一般、较差三个程度, 其中较强取值为 1.0, 一般取值为 0.5, 较差取值为 0。

综合以上四个指标, 并将各项的数量级统一, 非实时因素的计算表达式为

$$f_h = e^{-(\alpha_1 E - \alpha_2 T + \alpha_3 R)(1 - \alpha_4 E_r)} \quad (4)$$

式中, α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为各指标的权重。

2.2 实时因素分析建模

调度员的工作状态作为实时因素也会对调度操作的人因风险产生影响, 主要包括以下指标^[15]。

(1) 工作时长: 通过该调度员进行该操作时已连续工作的小时数来描述, 以变量 f 表示。

(2) 当值班次: 调度工作每日排班分为白班时段(07:00—15:00)、中班时段(15:00—23:00)、夜班时段(23:00—07:00), 以变量 p 表示, 白班取值为 0, 中班取值为 0.5, 夜班取值为 1。

(3) 心理因素: 表示进行该项操作时, 调度员受工作强度或操作时段等因素影响下的心理状况, 以变量 m 表示。心理因素可分为较好、一般、较差三个程度, 其中较好取值为 1.0, 一般取值为 0.8, 较差取值为 0.6^[10]。

实时因素的计算表达式为

$$f_n = e^{\frac{\beta_1 f}{24}(1 + \beta_2 p - \beta_3 m)} \quad (5)$$

式中, β_1 、 β_2 、 β_3 分别为各指标的权重。

3 基于 BCC 的调度操作任务优化分配

3.1 BCC 算法

细菌群体趋药性算法(BCC)^[15-16] 是基于生物学中用于模拟生物行为的细菌趋药性模型提出的寻优

算法, 利用细菌对引诱剂的反应运动原理在连续域中寻求最优解, 可同时处理连续变量问题及离散变量问题, 具有良好的优化性能。运用细菌群体趋药性算法对调度操作任务进行优化^[17-18], 具体步骤如下。

(1) 设定精度 ε 及初始参数 T_0 、 b 、 τ_c ^[19]。

$$\begin{aligned} T_0 &= \varepsilon^{0.3} \cdot 10^{-1.73} \\ b &= T_0(T_0^{-1.54} \cdot 10^{-0.6}) \\ \tau_c &= \left(\frac{b}{T_0}\right)^{0.3} \cdot 10^{1.16} \end{aligned} \quad (6)$$

(2) 确定细菌的移动状态。

以移动方向、步长来描述细菌的移动状态, 其中, 通过移动半径 r 以 $n-1$ 维的角度向量 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1})$ 来表示细菌在 n 维空间的移动方向。若以 $i = (1, 2, \dots, n)$ 表示维度编号, 以角度 φ_i 描述细菌在空间 $(i, i+1)$ 中移动时偏离原位置的方向, 则细菌的移动状态根据高斯概率密度的分布确定, 即

$$P(X_i = \varphi_i, v_i = \pm \mu_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left[-\frac{(\varphi_i - v_i)^2}{2\delta_i^2}\right] \quad (7)$$

式中: f_{pr} 为当前点与上一个点的函数值之差; l_{pr} 为当前点与上一个点的空间向量模; $\cos\theta = e^{-\tau_c \tau_{pr}}$, τ_c 为步骤(1)中的时间系数, τ_{pr} 为上一个点的运动轨迹持续时间。细菌在新的运动轨迹上的运动时间 τ 服从式(9)中的概率分布, 即

$$\begin{aligned} P(X = \tau) &= \frac{1}{T} e^{-\tau/T} \\ T &= \begin{cases} T_0, (f_{pr} / l_{pr} \geq 0) \\ T_0(1 + b |f_{pr} / l_{pr}|), (f_{pr} / l_{pr} < 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

当 φ_i 的值确定后, 将其与之前求解的移动角进行求和, 便可得出细菌新的移动方向向量。

(3) 确定细菌的移动步长。

以 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 描述细菌的空间位置, 以 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示移动步长, 那么, 细菌的空间位置可表示为

$$\begin{cases} x_1 = r \prod_{k=1}^{n-1} \cos \varphi_k \\ x_i = r \sin \varphi_{i-1} \prod_{k=1}^{n-1} \cos \varphi_k, i = 1, 2, \dots, n \\ x_n = r \sin \varphi_{n-1} \end{cases} \quad (9)$$

(4) 感知相邻更优中心点。

在细菌每次移动至新位置的过程中, 其需要对相邻环境进行搜索, 寻找相邻环境的细菌中是否具有更优中心点, 若存在更优中心点, 细菌趋向于移动至该中心点。假设某时刻的移动步数为 k , 则此刻细菌 i 是否具有相邻更优中心点的判断式可表示为

$$\text{center}(\bar{x}_{i,k}) = \text{Aver}(\bar{x}_{j,k} | f(\bar{x}_{j,k}) < f(\bar{x}_{i,k})),$$

$$\text{Aver}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) = (\sum_{i=1}^n \bar{x}_i) / n, \quad (10)$$

$$\text{dis}(\bar{x}_{j,k}, \bar{x}_{i,k}) < S, \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

式中: $\text{dis}(\bar{x}_{j,k}, \bar{x}_{i,k})$ 为细菌 i 和细菌 j 之间的空间距离; S 为细菌 i 的感知范围。

(5) 移动至中心点坐标。

当细菌向相邻中心点移动时, 其移动步长表示为

$$\bar{x}_{i1} = \text{rand}(\cdot) \text{dis}(\bar{x}_{i,k}, \text{center}(\bar{x}_{i,k})) \quad (11)$$

式中, $\text{rand}(\cdot)$ 为服从 $(0, 2)$ 均匀分布的随机值。

(6) 精英位置保留。

为避免由于算法的随机性使得细菌原先的精英位置舍弃, 在细菌群体每次步进后, 令群体中位置最次的细菌移动至本次步进前位置最优的细菌所在位置附近, 以便于优化过程的进行和精英位置的保留, 其表达式为

$$\bar{x}_w = \bar{x}_w + \text{rand}(\cdot)(\bar{x}_b - \bar{x}_w) \quad (12)$$

式中: \bar{x}_w 为最次细菌位置; \bar{x}_b 为最优细菌位置。

(7) 参数更新或结束算法。

当本次结果满足精度条件或达到最大移动步数时, 跳出迭代, 结束算法, 否则进行参数更新, 继续下一步的迭代。

3.2 调度操作任务优化分配问题的模型

设 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 为某日调度令的集合, 由于存在 n 条调度令, 因此理论上应存在 $n!$ 种排序方式。而在实际操作中, 由于某些调度令之间存在优先关系, 故实际排序方式必然小于 $n!$ 。调度令的顺序表示为 $x = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 。顺序 x 表示以调度令 o_1 起始, 以 o_n 结束的一种排序方式。定义综合人因风险指标: 将某项调度令涉及的调度员非实时因素和实时因素进行叠加, 以此反映调度操作过程中存在潜在风险的可能性。

定义 $\Delta f(x)$ 为计及任务延时的额外风险, 设任务 A 的操作起始时间为 t_0 、操作时间为 t_1 , 若 t_2 时刻 ($t_0 + t_1 > t_2$) 有另一调度任务 B 需要操作且所有调度员都不空闲, 则必须在任务 A 完成后任务 B 方可进行, 由于延误操作带来的风险称为额外风险, 其表达式如下。

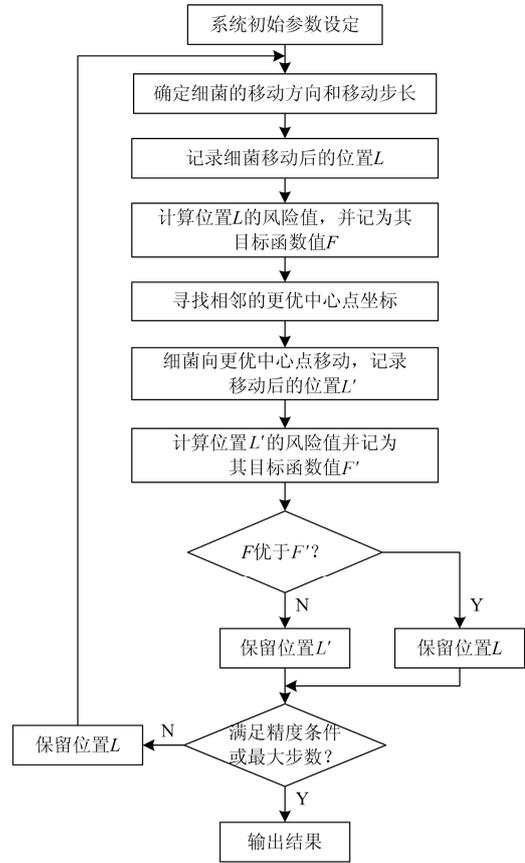


图3 基于 BCC 的调度操作任务优化分配流程图

Fig. 3 Optimizing sequence flowchart of power dispatching task with BCC algorithm

$$\Delta f(x) = \sum_{i=1}^{n_d} p_c \Delta t(x) \quad (13)$$

$$\Delta t(x) = t_0(x) + t_1(x) - t_2(x) \quad (14)$$

式中: p_c 为延时惩罚系数; n_d 为延误的任务数。

参考文献[19-20]中具有约束条件的目标函数的构建思想, 调度操作任务优化分配的目标函数表示为

$$\max f(x) = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^{\gamma} [f_{h,i}(x) + f_{n,i}(x)] + \Delta f(x) \quad (15)$$

式中, γ 为参与该项调度操作的人数。优化目标是寻找一种最优的任务顺序 x^* , 在给定的误差范围 ε 内使 $f(x^*) = \max \{f(x)\}$, 其中 $x, x^* \in O$ 。

(1) 工作量约束

$$f_i(x) = |f_{wi}(x) - f_{wj}(x)| < \varepsilon, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad i \neq j \quad (16)$$

式中, $f_{wi(j)}(x)$ ($i, j = 1, 2, 3$) 分别表示白班、中班及夜班工作量, 在精度 ε 范围内保证白班、中班及夜班三班的工作量均衡。

(2) 调度令执行顺序约束^[21-22]

$$x \in A, x \in B \quad (17)$$

$$\{A | PR_j > PR_i\} \quad (18)$$

矩阵 PR 用于存储调度令之间的优先关系，若调度令 i 必须在调度令 j 之前执行，则 $PR_{ij} = 1$ ，否则 $PR_{ij} = 0$ 。

$$\{B | o_i(t = t_{imeq}) < o_{d_3}\} \quad (19)$$

式中： t_{imeq} 为 500 kV 重要设备的操作时间； d_3 指夜班时段。由于重要设备的操作时间较长，且一旦发生失误对电网影响较大，因此该类调度令较其他调度令具有优先级，应尽量将该类调度令安排在白班或中班时段。

(3) 时间裕度约束

$$t_{im} \geq t_i + t_{i+1} \quad (20)$$

在实际调度操作中，若相连数项调度任务的操作都有相应的延时，根据式(13)的定义，任务延时会产生额外风险。为降低由于任务延时对调度工作造成的不利影响，应考虑合理的任务顺序安排，令时间裕度应满足相邻两项任务的操作时间和，尽量减少调度任务的延误，式(20)中 t_{im} 为时间裕度， t_i 为本项操作的操作时间， t_{i+1} 为下一项操作的操作时间。

采用 BCC 算法对调度任务进行优化分配，其具体流程如图 2 所示。

4 案例分析

为验证所提模型的合理性，以某电网实际调度工作为例，通过对调度操作人因风险影响因素集中各因素的重要性进行评分，采用层次评估法，分别确定非实时因素与实时因素中各项指标的权重值，如表 1 所示。

表 1 各因素指标权重值

Table 1 Weight coefficients of influencing factors

因素	系数	取值
工龄	α_1	0.082 7
工作技能	α_2	0.254 7
责任心	α_3	0.123 7
误操作率	α_4	0.538 9
工作时长	β_1	0.648 4
当值班次	β_2	0.229 6
心理因素	β_3	0.122 0

运用本文所提模型对某月 603 条操作任务的工作量进行计算，其中，操作类型 s 平均值为 0.75，因此，案例分析中取操作类型基准值 $s_0 = 0.75$ 。选取某日的调度操作任务进行优化分配。查阅当日调度当值调度员的员工档案，可得出所有调度员的非实时因素 4 项指标的参数，如表 2 所示。

表 2 值班调度员非实时因素指标参数

Table 2 Duty dispatcher's historical factor parameters

时段	人员	工龄	工作技能	责任心	误操作率
白班	A	5	熟练	一般	0
白班	B	4	一般	一般	0
白班	C	1	熟练	较强	0
中班	D	10	一般	较强	0
中班	E	8	熟练	一般	0
中班	F	7	不熟练	一般	0
夜班	G	7	熟练	一般	0
夜班	H	3	一般	一般	0
夜班	I	2	一般	一般	0

该日共 8 条操作任务，其操作信息如表 3 所示。根据操作任务内容可知，任务 7 必须优先于任务 8 进行操作。在操作类型中，“1”表示单项令，“2”表示综合令，“3”表示逐项令，每项任务的操作时间可由同类型操作任务的历史平均耗时来表示。假设操作的起始时间分别为 7:00、7:50、10:10、15:10、16:20、22:00、3:30、6:50。根据本文所提模型，可计算出 8 条操作任务的工作量分别为 148.8、144、18.6、57.6、37.5、162、18.6、18.6。运用 BCC 得出的最优操作序列，如表 4 所示。

表 3 操作任务信息

Table 3 Power dispatching task information

任务序号	操作内容	操作时间	操作类型	操作人数	步骤数
1	将 a 站 500 kV1 号主变由运行状态转为检修状态	62	2	3	4
2	将 220 kV b 线由检修状态转为运行状态	40	3	1	4
3	停用 220 kV c 线两侧开关重合闸	31	3	1	1
4	将 d 站 220 kV1 号母线 PT 由运行状态转为检修状态	24	2	1	4
5	将 e 站 220 kV 双母线运行方式调整为正常运行方式	50	1	2	1
6	将 500 kV f 线由运行状态转为检修状态	60	3	2	3
7	退出 g 站 220 kV 第二套母线保护	31	2	1	1
8	投入 g 站 220 kV 第二套母线保护	31	2	1	1

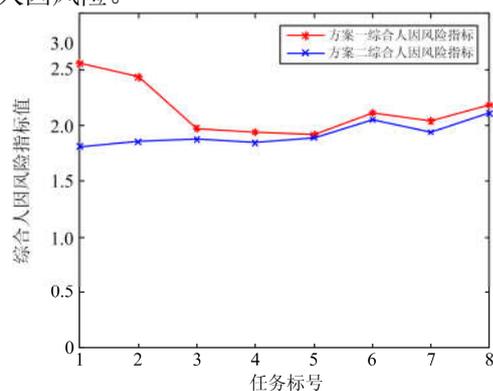
表 4 2 种分配方案比较

Table 4 Comparison between two certain optimal assigning schemes

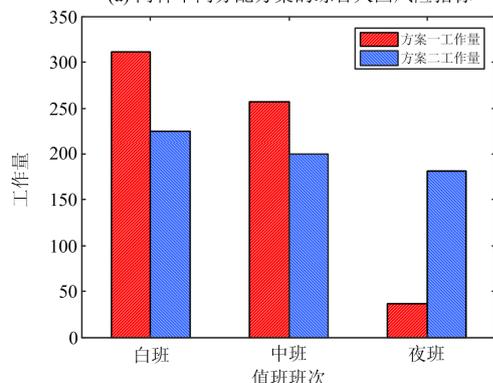
方案	操作顺序
方案一	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
方案二	3, 1, 4, 6, 7, 8, 2, 5

由图 4 及表 4 可知, 若未经优化分配, 按照方案一进行操作, 其综合人因风险指标值为 17.140, 且白班工作量占全日工作量的 51.4%, 中班占全日的 42.5%, 而夜班仅占 6.1%, 三班工作量差值较大, 不利于充分发挥调度中心人员利用率和工作效率。经过排序后, 按方案二进行操作, 其综合人因风险值为 15.364, 与方案一相比, 降低了操作的人因风险, 且三班工作量差值都控制在 8% 内, 满足工作量平衡的要求。另外, 优化后将 500 kV 重要设备的操作都安排在白班与中班时段, 保证了下级操作单位的时间利用率。

通过表 4、图 4 的对比可知, 对调度操作任务进行优化分配, 可降低日操作的总人因风险值, 尤其是对于电网迎峰度夏时期操作任务繁重的日期倍显重要, 提高了调度员的工作效率, 保证了调度工作的顺利执行。另外, 为进一步降低调度操作人因风险, 建议加强调度员培训, 有效提高调度员的责任心和工作能力等非实时因素指标, 并在实际安排调度操作任务时赋予合理的操作起始时间点, 尽量避免将任务安排在调度员工作时长较长的时段, 缓解调度员的疲劳程度, 改善调度员的实时因素指标, 降低人因风险。



(a) 两种不同分配方案的综合人因风险指标



(b) 两种不同分配方案的工作量结果

图 4 两种不同分配方案综合人因风险指标、工作量结果

Fig. 4 Result of workload and comprehensive human risk indicators of the above two optimal assigning schemes

5 结论

本文基于人因可靠性理论中的基本分析方法, 考虑影响调度操作人因风险的非实时和实时因素, 进行人因风险评估建模, 结合调度工作量, 并考虑调度任务的优先级、操作时间裕度, 在满足工作量平衡的条件下使调度工作安排合理、操作人因风险最小, 对提高调度工作效率以及电力系统可靠性和安全运行具有积极作用。基于 BCC 算法, 运用所提模型对实际电力调度操作任务进行人因风险评估和操作任务优化分配, 验证了其可行性和有效性。

参考文献

- [1] 阳富强, 吴超, 汪发松, 等. 1998-2008 年人因可靠性研究进展[J]. 科技导报, 2009, 27(8): 87-94.
YANG Fuqiang, WU Chao, WANG Fasong, et al. Review of studies on human reliability researches during 1998 to 2008[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(8): 87-94.
- [2] 吴丹. 电力调度运行中的调度安全风险及防护措施[J]. 山东工业技术, 2018(24): 181-182.
WU Dan. Dispatching security risks and protective measures in power dispatching operation[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(24): 181-182.
- [3] FUJITA Y, HOLLNAGEL E. Failures without errors: quantification of context in HRA[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 83(2): 145-151.
- [4] 陆海波, 王媚, 郭创新, 等. 基于 CREAM 的电网人为可靠性定量分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 37-42.
LU Haibo, WANG Mei, GUO Chuangxin, et al. A quantitative method for human reliability in power system based on CREAM[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 37-42.
- [5] 唐俊熙, 何迪, 郭创新. 基于模糊综合评估的电网人因可靠性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 63-68.
TANG Junxi, HE Di, GUO Chuangxin. Analysis of human reliability in power grid based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 63-68.
- [6] 吴官寅, 胡立生, 张建波. 基于改进型 CREAM 方法的核电厂数字化人机界面人因可靠性研究[J]. 自动化应用, 2017(11): 26-28, 31.
WU Guanyin, HU Lisheng, ZHANG Jianbo. Research on human reliability of digital human-machine interface in nuclear power plant based on improved CREAM method[J]. Automation Application, 2017(11): 26-28, 31.
- [7] 文东山, 暴英凯, 章禹, 等. 电力系统操作人因可靠性分析及其数据库系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 35-42.
WEN Dongshan, BAO Yingkai, ZHANG Yu, et al. Analysis of human reliability in power system operation and research on its database system[J]. Power System

Protection and Control, 2017, 45(11): 35-42.

[8] 陈海涵. 供电企业检修运维班组工作量评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 157-164.
CHEN Haihan. Research on team workload assessment of overhaul and maintenance operation of power supply enterprise[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 157-164.

[9] 方磊, 牛玉刚, 王思明, 等. 基于日前调度与实时控制的微网储能系统容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 102-110.
FANG Lei, NIU Yugang, WANG Siming, et al. Optimal capacity determination method based on day-ahead scheduling and real-time control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 102-110.

[10] 李春华. 广东电网调度操作安全风险量化评估模型研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
LI Chunhua. The research and application on the quantification scheduling evaluation model of operational safety risk in Guangdong Power Grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.

[11] 文东山. 电力系统操作人因可靠性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
WEN Dongshan. Research on human reliability in power system operation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[12] 暴英凯. 人为因素对电力系统运行可靠性影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
BAO Yingkai. Impact analysis of human factors on power system operation reliability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[13] MOHAGHEGH Z, MOSLEH A. Incorporating organizational factors into probabilistic risk assessment of complex socio-technical systems: principles and theoretical foundations[J]. Safety Science, 2009, 47(8): 1139-1158.

[14] GRIGORAS G, BARBULESCU C. Human errors monitoring in electrical transmission networks based on a partitioning algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 49: 128-136.

[15] 曹黎侠, 张建科. 细菌趋药性算法理论及应用研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2006(1): 44-46.
CAO Lixia, ZHANG Jianke. Development on bacterial chemotaxis optimization theory and its application[J]. Computer Engineering and Applications, 2006(1): 44-46.

[16] MULLER S D, MARCHETTO J, AIRAGHI S, et al. Optimization based on bacterial chemotaxis[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 16-29.

[17] 杨丽君, 吕雪姣, 李丹, 等. 基于多代理系统的主动配电网多故障动态修复策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6855-6865, 7076.
YANG Lijun, LÜ Xuejiao, LI Dan, et al. Dynamic repair-recovery strategy of multiple faults for active distribution network based on multi-agent system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6855-6865, 7076.

[18] 陈继明, 王元元, 孙名好, 等. 基于改进 BCC 算法的配电网综合运行优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 87-92.
CHEN Jiming, WANG Yuanyuan, SUN Mingyu, et al. Comprehensive operation optimization of distribution network based on improved bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2015, 36(1): 87-92.

[19] 黄伟, 张建华, 张聪, 等. 基于细菌群体趋药性算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 29-33.
HUANG Wei, ZHANG Jianhua, ZHANG Cong, et al. Reactive power optimization in power system based on bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 29-33.

[19] SUN Siyang, YANG Qiang, YAN Wenjun. Optimal temporal-spatial PEV charging scheduling in active power distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 379-388. DOI: 10.1186/s41601-017-0065-x.

[20] LI Jianlin, XUE Yushi, TIAN Liting, et al. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in grid-connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 389-396. DOI: 10.1186/s41601-017-0067-8.

[21] 韩本帅, 孙中尉, 崔海鹏. 智能变电站顺序控制方案研究[J]. 电工技术, 2015(6): 24-25, 27.
HAN Benshuai, SUN Zhongwei, CUI Haipeng. Research on sequence control scheme of intelligent substation[J]. Electric Engineering, 2015(6): 24-25, 27.

[22] 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.

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-03-06

作者简介:

陈碧云(1978—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统规划与可靠性; E-mail: 2242742@qq.com

李欣桐(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性; E-mail: li_xintong@foxmail.com

李滨(1975—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统最优运行与规划。E-mail: lizhen@gxu.edu.cn

(编辑 许威)