

交互式输电网检修计划多目标决策方法

刘文颖¹, 谢昶¹, 文晶¹, 王佳明¹, 李静²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Multi-Objective Decision Making Method for Maintenance Scheduling of Transmission Network

LIU Wenying¹, XIE Chang¹, WEN Jing¹, WANG Jiaming¹, LI Jing²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In essence the optimization of maintenance scheduling is a multi-objective and multi-constrained optimization problem with decision preference. At present, the research of this problem focuses in the field of single objective optimization, so decision-makers, diversified demand on optimization objectives cannot be satisfied. A multi-objective optimization model for maintenance scheduling of transmission network, in which the lowest maintenance cost and the minimum expected energy not supplied (EENS) are taken as objectives, is built, and an interactive multi-objective decision-making method is proposed to solve the built model. Based on the satisfaction degree of objective and the nearness degree of objective an interactive decision-making model is constructed, and a multi-objective optimization model is decomposed into three single-objective decision-making models to solve the multi-objective optimization problem. To avoid the arbitrariness in the artificial determination of objective weights and make the proposed method easy to apply, the subjective desire of the decision-maker is incarnated by continually adjusting satisfaction degree of each single-objective and nearness degree of overall objectives. The effectiveness of the built model and the proposed interactive multi-objective decision-making method is verified by simulation results of IEEE RTS-79 system.

KEY WORDS: maintenance scheduling; multi-objective decision making; interactive; objective satisfaction degree; objective nearness degree

摘要: 检修计划优化问题本质上是一个带有决策偏好的多目标多约束优化问题, 目前主要研究方向集中在单目标优化领域, 无法满足决策者对优化目标多元化的实际需求。建立了以检修成本费用最低和期望缺供电量最小为目标的输电网检修计划多目标优化模型, 并提出一种交互式多目标决策方

法进行求解。该方法以目标满意度和目标贴近度为基础构造交互式决策模型, 将多目标优化模型分解为 3 个单目标决策模型进行交互求解, 通过决策者对各单项目标满意度和目标总体贴近度的不断调整来体现其主观愿望, 避免了人为确定目标权重的任意性, 便于实际操作应用。通过 IEEE RTS-79 节点系统的仿真验证了文中所建模型和交互式多目标决策方法的有效性。

关键词: 检修计划; 多目标决策; 交互式; 目标满意度; 目标贴近度

0 引言

供电设备检修是电力工业生产的一项重要工作, 科学合理的检修计划是电网经济可靠运行和预防事故链发生的重要保障。目前供电企业检修计划仍是依靠专家经验由人工决策完成, 其决策过程更是涉及到调度、方式、线路及变电检修等多位决策者, 每位决策者都有各自关注的目标和不同的偏好信息。因此检修计划优化问题本质上是一个带有决策偏好的多目标多约束优化问题, 优化过程中需要考虑决策者的偏好信息^[1-4]。

国内外相关文献从不同角度对检修计划优化问题进行了大量研究, 但主要集中在单目标优化领域, 无法满足决策者对优化目标多元化的实际需求。文献[5]以系统负荷供应能力最大作为优化目标, 主要考虑线路检修对系统可靠性的影响。文献[6]以经济性目标作为数学模型的目标函数, 借助 Benders 分解法在处理大系统优化问题上的诸多优点, 包含了输电线路检修计划问题中复杂的网络约束, 但没有将可靠性价值纳入目标函数中。文献[7]

则以电价为基础将停电损失和检修成本转化为经济性目标函数,使经济性与可靠性达到统一,并采用免疫禁忌算法进行单目标优化。文献[8-9]将多个目标函数通过加权合并为单一目标函数,输出带有固定偏好信息的优化结果。

对于多目标优化问题,由于目标之间存在的不可公度性和矛盾性,目标函数的度量标准不一致,不能简单地通过加权来合并求解;而且,满足各个目标都达到最优解通常是不存在的,只能求得非劣解。在这种情况下,要求出多目标优化问题的解,必须由决策者根据其偏好结构给出其偏好规则或决策规则,从非劣解集中选出符合其偏好的满意解作为最终的决策方案。

因此本文建立兼顾经济性和运行风险的输电网检修计划多目标优化模型,提出一种基于目标满意度和目标贴近度的交互式多目标决策方法进行求解。该方法通过与决策者的不断交互,利用决策者的偏好信息引导搜索寻优过程,使搜索过程沿着决策人满意解的方向进行,最大限度地缩小搜索区域,有效加快寻找满意解的过程。

1 交互式多目标决策方法

1.1 目标函数

一般的,多目标优化问题(multi-objective optimization problem, MOP)可描述为以下形式^[10]

$$\begin{cases} \min & f(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})] \\ \text{s.t.} & h_k(\mathbf{x}) \geq 0, \mathbf{x} \in X \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为决策向量; $f(\mathbf{x})$ 为目标函数; X 为决策向量的取值空间; $h_k(\mathbf{x})$ 为等式或不等式约束条件函数。

由于MOP问题一般不存在绝对最优解,其决策结果与决策者的主观偏好紧密联系,所以决策者应参与整个决策过程,搜索寻优过程中逐步修正其偏好,使最后求得的解满足决策者的要求。本文通过定义单目标满意度和总体目标贴近度2个函数,将多目标优化模型转换为单目标决策模型进行交互求解,最终得到能充分体现决策者主观愿望的最佳决策方案。

1.2 单目标满意度函数

单目标满意度函数用于定量地描述决策人对各个决策目标的满意程度,定义如下^[11]:

$$m(f_i(\mathbf{x})) = \frac{f_i^- - f_i(\mathbf{x})}{f_i^- - f_i^*} \quad (2)$$

式中: $m(f_i(\mathbf{x}))$ 为目标 i 的目标满意度函数, $i=1,2,\dots,n$; f_i^* 、 f_i^- 分别为目标 i 的正、负理想点。当决策人对目标完全满意时, $m(f_i(\mathbf{x}))$ 取值为1;当决策人对目标完全不满意时, $m(f_i(\mathbf{x}))$ 取值为0;一般情况下, $m(f_i(\mathbf{x}))$ 为随 $f_i(\mathbf{x})$ 增加而减少的单调函数,取值在0到1之间。

1.3 总体目标贴近度

总体目标贴近度是从各目标综合的角度反映目标的总体达成程度^[12]。定义目标函数向量与其正、负理想点的夹角余弦为 $\cos a$ 、 $\cos b$ 。

$$\cos a = \frac{\sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}) f_i^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i(\mathbf{x}))^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i^*)^2}} \quad (3)$$

$$\cos b = \frac{\sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}) f_i^-}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i(\mathbf{x}))^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i^-)^2}} \quad (4)$$

在此基础上,构造总体目标贴近度函数 $I(\mathbf{x})$,如式(5)所示:

$$I(\mathbf{x}) = \frac{\cos a}{\cos a + \cos b} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i^-)^2 \cdot \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}) f_i^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i^-)^2} \cdot \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}) f_i^* + \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i^*)^2} \cdot \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}) f_i^-} \quad (5)$$

式中: $\cos a$ 、 $\cos b$ 反映了目标函数向量 $f_i(\mathbf{x})$ 与其正理想点 f_i^* 、负理想点 f_i^- 的接近程度; $I(\mathbf{x})$ 则同时反映了目标方案整体距离正负理想点的距离,值越大,则相应的目标方案离正理想点越贴近;反之,则目标方案离正理想点偏离越远。另外,为了消除不同量纲带来的不可公度性,计算总体目标贴近度之前还需对各个目标值进行归一化处理^[13]。

1.4 交互式决策模型

单目标满意度衡量了单个目标的达成程度,但由于单个目标之间存在相互制约、相互影响的关系,因此需要考虑多个目标的平衡协调控制。将单目标满意度和总体目标贴近度结合起来,就可以在交互决策过程中实现对总体目标的调整以及对各单个目标的调整。

本文构建SOP1、SOP2和SOP3 3种交互式决策模型,将多目标优化模型分解为单目标决策模型(single-objective optimization problem, SOP)进行

求解^[14-15]。

1) 总体目标贴度最大的决策模型(SOP1)

$$\max I(\mathbf{x}) \quad (6)$$

$$\text{s.t. } h_k(\mathbf{x}) \geq 0, \mathbf{x} \in X \quad (7)$$

2) 给定单目标满意度下限和调整幅度的决策模型(SOP2)

$$\max I(\mathbf{x}) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} m(f_i(\mathbf{x})) + y_i \geq \bar{m}_i^0 \\ 0 \leq y_i \leq Z_i, i \in J \\ m(f_i(\mathbf{x})) \geq \bar{m}_i^0, i \in \bar{J} \\ h_k(\mathbf{x}) \geq 0, \mathbf{x} \in X \end{cases} \quad (9)$$

式中: \bar{m}_i^0 为决策者根据主观愿望设定的目标满意度下限; y_i 为目标满意度对应的实际调整幅度; Z_i 为目标满意度对应的容许调整幅度; $J \cup \bar{J} = n$ 。

3) 满足单目标满意度和总体目标贴度要求的决策模型(SOP3)

$$\max \sum_{i \in J} y_i \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} I(\mathbf{x}) \geq \bar{I}_0 \\ m(f_i(\mathbf{x})) + y_i \geq \bar{m}_i^0, \\ 0 \leq y_i \leq Z_i, i \in J \\ m(f_i(\mathbf{x})) \geq \bar{m}_i^0, i \in \bar{J} \\ h_k(\mathbf{x}) \geq 0, \mathbf{x} \in X \end{cases} \quad (11)$$

式中 \bar{I}_0 为决策者根据主观愿望设定的总体目标贴度下限。

对 SOP1、SOP2 和 SOP3 单目标决策模型的求解, 即可得到满足决策者要求的最优解。但只有当上述 3 个单目标模型的最优解是原多目标决策问题的非劣解时, 最优解才是具有实际物理意义的最佳满意解。

2 输电网检修计划多目标优化模型

2.1 目标函数

与发电侧、配电侧设备检修不同, 输电网检修计划更侧重于电网可靠性和检修经济性的考虑。本文从输电网检修计划实际出发, 建立了以检修成本最低和期望缺供电量最小的多目标优化模型^[16-18]。

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T [\sum_{x \in S_t} C_x \prod_{i=1}^M P_i^{x_i} (1 - P_i)^{1-x_i}] T_i \quad (12)$$

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T P_i^t z_i^t u_i^t \quad (13)$$

式中: F_1 为期望缺供电量值(the expected energy not supplied, EENS); T 为检修时段数; S_t 为检修期间

第 t 个时段有切负荷的系统失效状态集合; $\mathbf{x} = (x_1, \mathbf{L}, x_n)$ 为元件状态向量, 代表一个系统状态; C_x 为系统故障状态 \mathbf{x} 的切负荷量; M 为系统元件数; x_i 为元件 i 的状态, $x_i = 1$ 表示其处于停运状态, $x_i = 0$ 表示其处于运行状态; P_i 为元件 i 的停运概率; T_i 是检修时段单位小时数; F_2 为检修成本费用; N 为待检设备总数; p_i^t 为电力公司一个班组检修线路 i 的单位时间费用, 特别计及节假日检修而额外增加的费用; z_i^t 为第 t 个时段线路 i 安排的检修班组; u_i^t 为设备检修状态, $u_i^t = 1$ 为线路 i 在第 t 个时段停电检修, $u_i^t = 0$ 为线路 i 在第 t 个时段正常运行。

2.2 约束条件

$$u_i^t = \begin{cases} 1 & s_i \leq t \leq s_i + m_i(z_i) \\ 0 & t \leq e_i, t \geq l_i + m_i(z_i) \\ 0 \text{ 或 } 1 & e_i \leq t \leq l_i \end{cases} \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^T z_i^t u_i^t = b_i \quad (15)$$

$$s_j > s_i + m_i + 1 \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N z_i^t u_i^t \leq Z_{\max} \quad (17)$$

$$|P_l| \leq P_{l_{\max}} \quad (18)$$

式中: s_i 表示线路 i 在第 s_i 时段开始检修; e_i 和 l_i 分别为线路 i 可开始检修的最早时间段和最迟时间段; b_i 为线路 i 检修所需的工作量; m_i 为线路 i 检修持续时间段, 且 $m_i = b_i / z_i$; Z_{\max} 为第 t 时段所能进行检修的工作量上限; s_j 为与线路 i 存在检修冲突的线路 j 开始检修时间; P_l 为线路 l 的潮流复向量; $P_{l_{\max}}$ 为线路 l 允许通过的潮流限值。

3 基于交互式多目标决策方法的输电网检修计划优化

3.1 检修计划交互式决策模型

根据上述提出的输电网检修计划优化模型, 本文采用交互式多目标决策方法对其进行模型转换后求解。首先, 依据公式(2)的定义, 可得出期望缺供电量和检修成本 2 个目标的单目标满意度表达式; 其次, 依据式(3)~(5)的定义, 可得出总体目标贴度 $I(\mathbf{x})$ 的表达式; 最后按照交互式多目标决策方法的模型转换规则, 构建出输电网检修计划多目标优化的辅助决策模型 SOP4、SOP5 和 SOP6。

1) 总体目标贴度最大决策模型(SOP4)

$$\max I(\mathbf{x}) \quad (19)$$

$$\text{s.t. } h_k(\mathbf{x}) \geq 0, \mathbf{x} \in X \quad (20)$$

式中 $h_k(\mathbf{x}) \geq 0$ 为式(14)–(18)表示的检修计划约束条件, $k \in [1, 5]$ 。

2) 给定单目标满意度下限和调整幅度的决策模型(SOP5)

$$\max I(\mathbf{x}) \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} m(F_1) + y_1 \geq \bar{m}_1^0, & 0 \leq y_1 \leq Z_1 \\ m(F_2) + y_2 \geq \bar{m}_2^0, & 0 \leq y_2 \leq Z_2 \\ h_k(\mathbf{x}) \geq 0, \mathbf{x} \in X \end{cases} \quad (22)$$

式中: \bar{m}_1^0 、 \bar{m}_2^0 分别为决策者设定的目标 F_1 和 F_2 的满意度下限; Z_1 、 Z_2 分别为 F_1 和 F_2 对应的目标满意度容许调整幅度; y_1 、 y_2 分别为 F_1 和 F_2 对应的目标满意度实际调整幅度。

3) 给定单目标满意度下限和总体目标贴近度下限的决策模型(SOP6)

$$\max \sum_{i \in 2} y_i \quad (23)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} I(\mathbf{x}) \geq \bar{I}_0 \\ m(F_1) + y_1 \geq \bar{m}_1^0, & 0 \leq y_1 \leq Z_1 \\ m(F_2) + y_2 \geq \bar{m}_2^0, & 0 \leq y_2 \leq Z_2 \\ h_k(\mathbf{x}) \geq 0, \mathbf{x} \in X \end{cases} \quad (24)$$

式中 \bar{I}_0 为决策者根据检修计划实际问题设定的总体目标贴近度下限。

3.2 改进粒子群算法

通过上述处理, 输电网检修计划多目标优化模型就转化为 SOP4、SOP5 和 SOP6 形式的单目标决策模型, 依次进行交互式优化求解, 最终可得到满足决策者偏好的检修计划优化方案。本文采用改进粒子群算法对 SOP4、SOP5 和 SOP6 等单目标决策模型进行求解^[19-22]。

粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是一种群体智能优化算法, 将优化问题的解看作无质量无体积的粒子, 通过粒子追踪个体最优位置和全局最优位置在搜索空间中的移动, 实现对最优解的搜索。粒子按照式(25)–(26)来更新自己的速度和位置。

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1r_1(p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2r_2(p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (25)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (26)$$

式中: t 为迭代次数; w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为加速常数; r_1 、 r_2 为服从[0, 1]均匀分布的随机数; v_{id} 为第 i 个粒子速度向量的第 d 个分量; x_{id} 为第 i 个粒子位置向量的第 d 个分量; p_{id} 为第 i 个粒子的个体最优位置; p_{gd} 为第 i 个粒子的全局最优位置。

PSO 算法中, 惯性权重 w 的取值对算法收敛性有很大的影响: w 较大时, 全局搜索能力较强, 有

利于跳出局部极小点; w 较小时, 局部搜索能力较强, 有利于算法收敛和提高解的精度。因此本文采用一种动态惯性权重来平衡 PSO 算法的全局和局部搜索能力, 具体如式(27)所示。

$$w = w_{\max} - t \frac{w_{\max} - w_{\min}}{T_{\max}} \quad (27)$$

式中: T_{\max} 为算法最大迭代次数; w_{\max} 为最大惯性权重; w_{\min} 为最小惯性权重。

为能够更好地保持粒子种群的多样性, 避免算法过早收敛, 本文在 PSO 算法中引入变异操作。当全局最优位置 p_{gd} 较长时间无明显变化时, 对种群中部分粒子进行如下变异操作: 假设给定一个变异概率 P_m , 首先根据适应值的大小对种群中粒子进行排序, 选取适应值最大的 m 个粒子, 并产生相对应的 m 个分布于[0, 1]之间的随机数 r_i ; 然后判断 r_i 与变异概率 P_m 的大小, 若 $r_i < P_m$, 则按照式(28)产生粒子新的位置, 并进入下一次迭代。

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t (1 + 0.5h) \quad (28)$$

式中: η 为服从[0, 1]高斯分布的随机变量; P_m 可取[0.1, 0.3]之间的任意值。

3.3 交互式输电网检修计划多目标决策流程

交互式检修计划优化计算流程如图 1 所示。

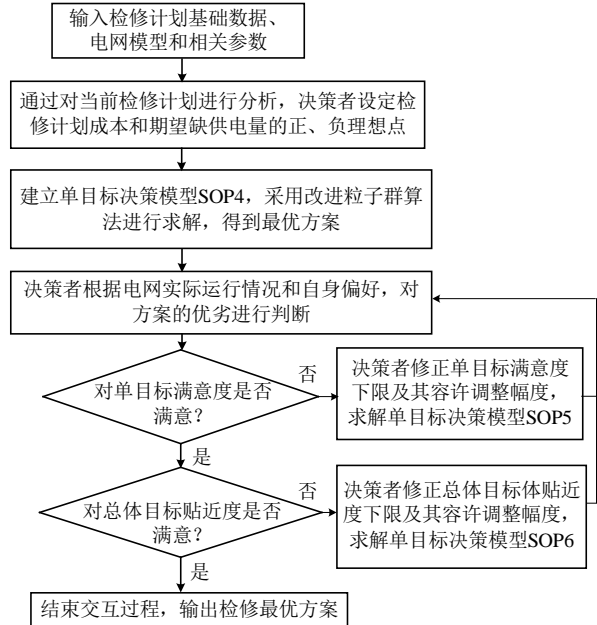


图 1 交互式检修计划优化计算流程

Fig. 1 Flow chart of interactive optimization of maintenance scheduling

4 算例分析

本文以 IEEE RTS-79 节点系统为例进行仿真计算以验证本文模型和算法的可行性。该系统包含 24 个节点、32 台发电机和 38 条线路, 具体参数见文

献[23]。待检修设备信息如表 1 所示,检修周期为 1 个月,检修时段以 d 为单位;线路检修成本为 5 万元/(d ·班组),节假日翻倍;检修资源约束为 3 班组/ d ,即每天检修所需的班组不超过 3 个。改进粒子群算法的参数设置为:粒子种群数设为 80,最大迭代次数为 150,学习因子 $c_1=c_2=2.0$,惯性权重 $w_{\max}=0.95$, $w_{\min}=0.35$,变异概率 $P_m=0.25$ 。

表 1 待检线路信息

Tab. 1 Information of transmission lines to be repaired

线路	始端节点	末端节点	b_i	e_i	l_i
1	N_1	N_2	2	2	10
2	N_2	N_4	5	10	22
3	N_4	N_9	3	4	13
4	N_9	N_{12}	4	11	21
5	N_{10}	N_{11}	4	14	24
6	N_{12}	N_{23}	6	13	28
7	N_{15}	N_{21}	5	18	30
8	N_{17}	N_{22}	8	1	18

根据算例中电网运行情况和待检修设备信息,决策者将期望缺供电量 F_1 和检修成本 F_2 的正负理想值分别设为 $F_1^*=6\ 830\text{ MW}\cdot\text{h}$, $F_2^*=185$ 万元, $F_1^-=7\ 650\text{ MW}\cdot\text{h}$, $F_2^-=600$ 万元。下面采用交互式多目标决策方法对待检修设备信息进行优化。

1) 以总体目标贴近度最大为目标建立 SOP4 模型并进行第一次求解,得出最优解 $x^{(0)}$ 。相应的总体目标贴近度、单目标满意度及目标值为: $I(x^{(0)})=0.522\ 7$, $m(F_1(x^{(0)}))=0.594$, $m(F_2(x^{(0)}))=0.947$, $F_1(x^{(0)})=7\ 163\text{ MW}\cdot\text{h}$, $F_2(x^{(0)})=207$ 万元。

2) 第一次求解后,决策者认为 $x^{(0)}$ 的检修方案可靠性较差,即 $m(F_1(x^{(0)}))$ 较小,提出各单目标满意度下限为 $\bar{m}(F_1(x))=\bar{m}(F_2(x))=0.70$,容许调整幅度为 $Z_1=0.11$,建立 SOP5 模型并进行求解,得出最优解 $x^{(1)}$ 。相应的总体目标贴近度、单目标满意度及目标值为: $I(x^{(1)})=0.499\ 5$, $m(F_1(x^{(1)}))=0.836$, $m(F_2(x^{(1)}))=0.711$, $F_1(x^{(1)})=6\ 964\text{ MW}\cdot\text{h}$, $F_2(x^{(1)})=305$ 万元。

3) 第 2 次求解完成,决策者对检修成本费用 $F_2(x^{(1)})$ 不满意,并认为总体目标贴近度 $I(x^{(1)})$ 过低,提出新的交互要求:各单目标满意度下限值为 $\bar{m}(F_1(x))=\bar{m}(F_2(x))=0.75$,总体目标贴近度下限值为 $\bar{I}_0=0.5$,容许调整幅度为 $Z_2=0.04$,并建立 SOP6 模型并进行求解,得出最优解 $x^{(2)}$ 。相应的总体目标贴近度、单目标满意度及目标值为: $I(x^{(2)})=0.512\ 5$, $m(F_1(x^{(2)}))=0.793$, $m(F_2(x^{(2)}))=0.865$, $F_1(x^{(2)})=7\ 008\text{ MW}\cdot\text{h}$, $F_2(x^{(2)})=241$ 万元。

4) 最终决策者对最优解 $x^{(2)}$ 及目标值 $F_1(x^{(2)})$ 、 $F_2(x^{(2)})$ 感到满意,没有再提出新的交互要求,从而确定 $x^{(2)}$ 为最终的检修优化方案。

综上所述,本文方法采用单目标满意度和总体目标贴近度 2 个指标实现了决策者偏好信息的量化处理,降低了算法的复杂度,有利于检修计划决策者进行方便、友好的优化计算;3 种单目标决策模型将整个优化问题分解为基于交互过程的分段子优化问题,平衡协调了多优化目标之间的矛盾,能够引导优化结果向决策者理想的最优解逼近;算例中通过 2 次交互即可得到满足决策者偏好的检修最优方案,表明该方法通过较少的优化计算就实现计算收敛,具有较高的实用性。

5 结论

针对我国输电网检修计划优化的实际情况,本文提出一种交互式多目标决策方法,通过定义单目标满意度和总体目标贴近度将检修计划多目标优化模型转换为单目标决策模型进行交互求解,并引导决策者根据自身偏好控制优化方向,解决了多目标优化问题中目标之间难以协调均衡的问题,避免了多目标向单目标转化过程中人为选取权值随意性的缺陷。在此基础上,以检修成本和期望缺供电量最小为目标,建立了检修计划多目标优化模型,统筹考虑了检修计划经济性和可靠性的多重目标。算例仿真结果表明该方法可以得到能充分体现决策者主观意愿的检修计划优化方案,且便于实际操作应用。

参考文献

- [1] 丁明,冯永青.发输电设备联合检修安排模型及算法研究[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[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 18-23(in Chinese).
- [2] 张节潭,王茂春,徐有蕊,等.采用最小累积风险度法的含风电场电力系统发电机组检修计划[J].电网技术,2011,35(5):97-102.
Zhang Jietan, Wang Maochun, Xu Yourui, et al. Generation unit maintenance scheduling based on minimum cumulative risk algorithm for power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 97-102 (in Chinese).
- [3] 任震,黄金凤,黄雯莹.安排交直流并联储输电线路计划检修的新方法[J].电力自动化设备,2004,24(1):19-22.
Ren Zhen, Huang Jinfeng, Huang Wenying. Scheduled maintenance of AC/DC hybrid transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1): 19-22(in Chinese).
- [4] 许旭峰,黄民翔,王婷婷,等.基于模糊机会约束二层规划的配电网检修计划优化[J].电工技术学报,2010,25(3):2068-2072.

- Xu Xufeng, Huang Minxiang, Wang Tingting, et al. Optimization of distribution network maintenance scheduling based on fuzzy chance-constrained bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 2068-2072(in Chinese).
- [5] Pinto L M V G, Filho J F P, Pereira M V F. A model for the maintenance schedule of an electrical generation transmission system[J]. Circuits and Systems, 1991: 1216-1219.
- [6] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的输电网短期线路检修计划[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 65-71.
- Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. Short-term transmission line maintenance scheduling based on credibility theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 65-71 (in Chinese).
- [7] 黄弦超, 舒隽, 张粒子, 等. 免疫禁忌混合智能优化算法在配电网检修优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 96-100.
- Huang Xianchao, Shu Jun, Zhang Lizi, et al. Distribution maintenance scheduling using an intelligent optimal approach mixed with immune algorithm and TABU search[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 96-100(in Chinese).
- [8] 许旭锋, 黄民翔, 王婷婷, 等. 供电设备检修优化算法及其在地区电网中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 31-35.
- Xu Xufeng, Huang Minxiang, Wang Tingting, et al. Optimization algorithm of power supply equipment maintenance scheduling and its application in regional power network[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 31-35(in Chinese).
- [9] 张粒子, 黄弦超, 舒隽, 等. 配电网检修计划优化模型设计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 50-52.
- Zhang Lizi, Huang Xianchao, Shu Jun, et al. Design and implementation of an optimization model for distribution network maintenance scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 50-52(in Chinese).
- [10] 雷德明, 严新平. 多目标智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 30-35.
- [11] 张欣莉. 基于目标满意度的交互式多目标决策改进方法[J]. 系统工程, 2004, 22(9): 10-13.
- Zhang Xinli. An improved method of interactive multi-objective decision-making based on objective satisfaction degree[J]. System Engineering, 2004, 22(9): 10-13(in Chinese).
- [12] 徐泽水. 一种基于目标贴近度的多目标决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 9(1): 101-104.
- Xu Zeshui. A method based on objective similarity scale for multi-objective decision-making[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2001, 9(1): 101-104(in Chinese).
- [13] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 22-29.
- [14] Basu M. An interactive fuzzy satisfying method based on evolutionary programming technique for multi-objective short-term hydrothermal scheduling[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(2-3): 277-285.
- [15] 周宏安. 基于方案贴近度和满意度的交互式不确定多属性决策方法[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(20): 35-40.
- Zhou Hongan. Interactive method based on similarity degree and satisfactory degree of alternative for uncertain in multi-attribute decision-making[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009, 39(20): 35-40(in Chinese).
- [16] 魏少岩, 徐飞, 闵勇. 输电线路检修计划模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 41-44.
- Wei Shaoyan, Xu Fei, Min Yong. Modeling on maintenance scheduling of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 41-44(in Chinese).
- [17] 许旭锋, 黄民翔, 王婷婷, 等. 基于机会约束 2 层规划的输电线路检修计划优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 25-29.
- Xu Xufeng, Huang Minxiang, Wang Tingting, et al. Optimization of transmission line maintenance scheduling based on chance-constrained bi-level programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 25-29(in Chinese).
- [18] 束洪春, 胡泽江, 谢一工. 计及隐性损失的输电线路检修计划优化方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 34-38.
- Shu Hongchun, Hu Zejiang, Xie Yigong. An optimized scheduling method for transmission network maintenance with minimum hidden losses[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 34-38(in Chinese).
- [19] 张庭场, 耿光飞. 基于改进粒子群算法的中压配电网无功优化[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 158-162.
- Zhang Tingchang, Geng Guangfei. Reactive power optimization for medium voltage distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 158-162(in Chinese).
- [20] 陈海良, 郭瑞鹏. 基于改进离散粒子群算法的电力系统机组组合问题[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 94-99.
- Chen Hailiang, Guo Ruipeng. Unit commitment based on improved discrete particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 94-99(in Chinese).
- [21] 杨志凌, 刘永前. 应用粒子群优化算法的短期风电功率预测[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 159-164.
- Yang Zhiling, Liu Yongqian. Short-term wind power prediction with particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 159-164 (in Chinese).
- [22] 韩海英, 和敬涵, 王小君, 等. 基于改进粒子群算法的电动车参与负荷平抑策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 165-169.
- Han Haiying, He Jinghan, Wang Xiaojun, et al. An improved particle swarm optimization based load response strategy with participation of vehicle to grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 165-169 (in Chinese).
- [23] IEEE reliability test system. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1979, 98(6): 2047-2054.



刘文颖

收稿日期: 2012-11-23.

作者简介:

刘文颖(1955), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统智能调度及大电网安全防御;

谢昶(1983), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, E-mail: xiechang83@126.com;

文晶(1987), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制;

王佳明(1985), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制;

李静(1983), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电网调度自动化。

(责任编辑 王晔)