

DOI: 10.7667/PSPC180576

基于节点综合权值的电力应急物资调度模型研究

侯慧¹, 耿浩¹, 肖祥², 黄勇², 于士文¹, 俞菊芳¹, 唐金锐¹

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510000)

摘要: 电力系统受损后恢复阶段, 科学合理的电力应急物资调度模型必不可少。为此, 提出一种基于节点综合权值的电力应急物资调度模型。首先分析建立以物资满意度和时间满意度为目标的函数。其次在目标函数优化过程中, 综合考虑影响应急点重要性的主观因素及客观因素以确定各应急点的综合权值作为目标函数的参数。最后通过对粤西某局部电力系统及电力应急物资调度图进行仿真分析, 并与随机调度下的结果进行比较, 验证了所提模型的科学性及有效性。

关键词: 电力系统恢复; 应急点权值; 物资满意度; 时间满意度; 电力应急物资调度

Research on dispatching model of electric emergency materials based on comprehensive weight of nodes

HOU Hui¹, GENG Hao¹, XIAO Xiang², HUANG Yong², YU Shiwen¹, YU Jufang¹, TANG Jinrui¹

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Guangdong Power Grid Co., LTD Electric Power Research Institute, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The scientific and reasonable dispatching model for electric power emergency material is indispensable in the recovery stage of electric power system after damage. Therefore, an electric power emergency material scheduling model is presented in this paper. Firstly, the objective functions of material satisfaction and time satisfaction are analyzed and established. Secondly, the subjective and objective factors affecting the importance of emergency points are considered synthetically in the process of optimization of objective functions to determine the comprehensive weights of each emergency point as the parameters of the objective functions. Finally, through the simulation analysis of a local electric power system in western Guangdong and the dispatch diagram of emergency materials of electric power, compared with the results under random scheduling, the proposed model is verified to be scientific and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707139) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Electric Power Research Institute (No. GDKJXM20162449).

Key words: electric power system recovery; emergency point weight; material satisfaction; time satisfaction; electric power emergency material dispatching

0 引言

稳定的电力系统正常运行是维持社会秩序的重要因素, 大规模、长时间的停电事故将给社会、经济带来严重影响。停电事故发生后, 及时快速恢复电力系统具有重要意义, 而电力应急物资的合理调度是灾后快速恢复电力系统的重要环节。

国内外学者对应急物资调度问题进行了一系列

研究, 考虑的目标函数主要为为物资和时间等变量。针对物资优化问题, 文献[1-4]提出以物资满意度作为目标函数建立模型, 最大化满足需求的物资分配, 然而并没有考虑应急点对运输时间的满意程度; 针对时间优化问题, 文献[5-8]研究了以应急反应时间最短为目标函数的物资调度模型, 可以解决应急物资的需求快速分配决策的问题, 然而忽略了应急点对物资的满意度问题。以上研究均较少考虑到对各应急受灾点的重要程度进行分类。

然而, 在对目标函数优化求解过程中, 由于各应急点信息不一致, 其对物资及时间的需求程度往

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51707139); 南网广东省电力科学研究院科技项目资助(GDKJXM20162449)

往不同, 需要对各应急点重要性进行评估。对于电力系统中节点重要性评估, 大多数文献针对拓扑结构及电气指标做了部分研究。文献[9-12]基于复杂网络理论, 从电网拓扑结构出发, 通过复杂网络理论的各拓扑特征参数描述电网节点的脆弱程度及其关键性。文献[13]在对电力系统待恢复区域重要性评估中, 提出了输电介数的概念。文献[14]基于电气距离提出了网络节点电气耦合连接度的概念, 并将其作为衡量电力系统节点重要性的指标。文献[15-16]提出线路潮流介数及传输介数并将其应用于电力系统关键线路的辨识。然而, 将节点重要性研究应用于电力应急调度中的研究尚不多见, 在电力系统应急调度中, 仅从客观角度评估节点重要性程度是远远不够的, 某些灾害情况下影响节点重要性的主观因素(负荷损失、负荷类型、所处位置及经济损失等)可能导致电力应急物资调度达不到最优。

因此, 本文基于应急点重要性权值的分析, 考虑应急物资供不应求的情况, 提出物资满意度及时间满意度两个目标函数, 并且在优化求解目标函数的过程中, 同时考虑主观因素及客观因素求取各应急点权值, 通过对粤西某局部电力系统及电力应急物资调度图进行仿真分析, 并与随机调度下的结果进行比较, 验证了所提模型的科学性及其有效性。

1 电力应急物资调度结构框架

本文提出以物资满意度及时间满意度为目标函数, 建立电力应急物资调度模型, 其结构框架如图 1 所示。

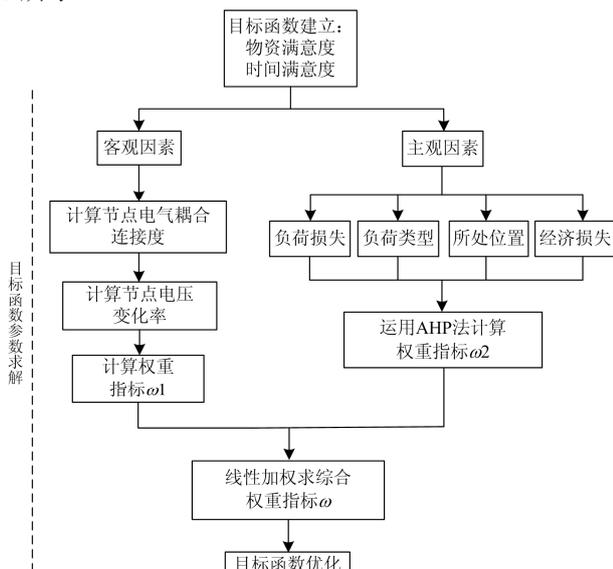


图 1 结构框架图

Fig. 1 Structural framework

本文框架具体如下。

1) 提出电力应急物资调度的目标函数, 包括物资满意度及时间满意度。

2) 求解目标函数中的参数(应急点重要性权值), 步骤如下。

Step 1 考虑影响应急点重要性的主观因素指标(负荷损失、负荷类型、所处位置及经济损失等), 采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)^[17]进行各应急点的主观因素权值计算;

Step 2 考虑影响电力系统节点重要性的客观因素指标(节点电气耦合连接度及节点电压变化率等), 进行应急点的客观因素权值计算;

Step 3 将应急点主观权值及客观权值进行线性加权, 得到应急点重要性权值。

3) 基于 Matlab 遗传算法工具箱对多目标函数进行优化, 并进行算例分析。

2 电力应急物资调度模型建立

电力系统大面积停电后, 应急物资的调度是电力系统恢复的重要工作之一, 科学合理的调度能够保障电力系统快速恢复负荷, 减小因电力系统损毁所带来的损失。

在应急恢复初期, 应急物资往往供不应求, 本文考虑该情况, 从物资及时间两个角度, 建立以物资满意度及时间满意度为目标函数的多目标优化调度模型。物资满意度设定为应急点所得物资数与所需物资数之比, 时间满意度设定为应急点所得物资率与满意度函数的乘积。

电力应急物资运输图如图 2 所示。

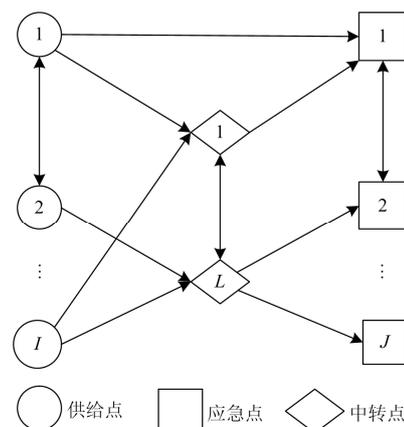


图 2 电力应急物资运输图

Fig. 2 Transportation map of electric power emergency materials

模型的假设如下。

1) 信息可靠, 即各节点物资供给量与物资需求

量已知。

2) 模型考虑调度节点分三层: 供应点、中转点及应急点。其中, 考虑各中转点间及各应急点间物资能够相互供给。

3) 假设供给点物资量供应不能全部满足应急点需求。

各参数含义如下: I 为供应点个数; L 为中转点个数; J 为应急点个数; ω_j 为应急点 j 处的重要性权值; N_j 为应急点 j 处所需物资量; $f_j(\bullet)$ 为应急点 j 处的时间满意度函数; t_{ij} 为节点 i 到节点 j 的时间; x_{ij} 为节点 i 到节点 j 的物资量; a_i 为供应点 i 储存的物资量。

目标函数如下。

物资满意度 Z_1 为

$$Z_1 = \sum_{j=1}^J \left\{ \left[\sum_{i=1}^{I+L+J} x_{i(I+L+j)} - \sum_{i=I+L+1}^{I+L+J} x_{(I+L+j)i} \right] \omega_j (N_j)^{-1} \right\} \quad (1)$$

时间满意度 Z_2 为

$$Z_2 = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \frac{x_{ij}}{N_j} \cdot f_j(t_{ij}) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=I+L+1}^{I+L+J} \frac{x_{ij}}{N_j} \cdot f_j(t_{ij}) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^L \left\{ \frac{x_{ij}}{N_j} \cdot f_j(\max_{i \in I} t_{il}) + t_{ij} \right\} \quad (2)$$

式中, $f_j(\bullet)$ 的函数表达式为

$$f_j(t_{ij}) = \begin{cases} 1, & t_{ij} \leq L_j \\ e^{-t_{ij}^2 / \theta_j}, & L_j \leq t_{ij} \leq U_j \\ 0, & t_{ij} \geq U_j \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_j 表示应急点 j 对运输时间的紧急程度, θ_j 越小, 表示应急点 j 对物资需求越紧急; L_j 、 U_j 表示应急点 j 对物资运输时间满意度的下限及上限, 为已知量。

多目标函数约束条件如下。

1) 供给点物资量平衡, 即各供给点输出量小于等于储存量。

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} + \sum_{l=1}^L x_{il} \leq a_i, i \in I \quad (4)$$

2) 中转点物资量平衡, 即中转点物资接收量大于等于输出量。

$$\sum_{i=1}^I x_{il} \geq \sum_{j=1}^J x_{lj}, l \in L \quad (5)$$

3) 应急点物资量平衡, 即应急点输出物资量小于等于接收的物资量。

$$\sum_{i=1}^{I+L+J} x_{ij} - \sum_{i=I+L+1}^{I+L+J} x_{ji} \geq 0, j \in J \quad (6)$$

4) 应急点物资约束, 接收量小于等于需求量。

$$\sum_{i=1}^{I+L+J} x_{ij} - \sum_{i=I+L+1}^{I+L+J} x_{ji} \leq N_j, j \in J \quad (7)$$

5) 变量非负。

$$x_{ij} \geq 0, x_{il} \geq 0, x_{jl} \geq 0 \quad (8)$$

6) 受灾权重平衡。

$$\sum_{j=1}^J \omega_j = 1 \quad (9)$$

3 应急点重要性权值确定

本文中通过对应急点客观因素权值和主观因素权值进行线性加权, 最终获得应急点重要性权值。

3.1 客观因素角度

1) 节点电气耦合连接度

在电力系统中, 节点 i 、 j 之间的电气距离可表示为节点之间的等值阻抗 $Z_{ij, equ}$, 为节点阻抗矩阵中第 i 行、第 j 列对应的元素。其物理意义为在 j 点单独注入电流后, i 点产生电压与 j 点注入电流之比。

对于一个 N 节点的电力系统, 节点 i 的电气耦合连接度定义为^[14]

$$D_{e,i} = 1 / \sum_{j=1, j \neq i}^N Z_{ij, equ} \quad (10)$$

电气耦合连接度从电力系统角度评估各节点在电力系统中的重要性, 其值越大, 表明该节点越重要。

2) 节点电压变化率

电力系统停电事故发生后, 系统中一些节点带负荷能力下降, 导致电力系统中各节点电压变化。而电力系统各节点电压必须稳定在一定范围内, 节点电压偏移越大, 对电力系统的危害越大, 故本文采用节点电压变化率来衡量电力系统中各节点重要性程度。节点 i 电压变化率为

$$\Delta V_i = \frac{|V'_i - V_i|}{V_i} \quad (11)$$

3) 节点重要性程度

综合考虑以上节点电气耦合连接度和节点电压变化率等两个因素, 本文定义节点 i 重要性权值 ω_i 为

$$\omega_i = (D_{e,i} + \Delta V_i) / 2 \quad (12)$$

式中, 由于 $D_{e,i}$ 、 ΔV_i 的物理意义不一致, 求解多节点重要性权值时, 应对 $D_{e,i}$ 及 ΔV_i 序列进行归一化处理

理。归一化处理如下:

对于序列 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 归一化之后序列为 $X' = (X'_1, X'_2, \dots, X'_n)$ 。其中

$$X'_i = (X_i - \min(X)) / (\max(X) - \min(X)) \quad (13)$$

3.2 主观因素角度

本文为了使应急点重要性权值确定更加合理, 在应急点重要性权值确定中考虑一些主观因素, 考虑到电网节点受灾后, 负荷损失、负荷类型、经济损失及所处位置等因素较难快速精确确定, 故本文仅对这些因素进行模糊处理, 比较两两应急节点对应因素的影响大小, 并使用 AHP 法确定各应急点的主观因素权值 ω_2 。

具体步骤如下^[17]。

Step 1 建立递阶层次结构模型。深入分析所研究的问题, 确定目标层、准则层和方案层, 如图 5 所示。

Step 2 构造出各层次中的所有判断矩阵。评价指标相对重要性程度如表 1 所示。

表 1 评价指标相对重要性程度

标度	含义
1	表示两个元素相比, 具有同样重要性
3	表示两个元素相比, 前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比, 前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比, 前者比后者极其重要
9	表示两个元素相比, 前者比后者强烈重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值

若元素 i 和元素 j 的重要性相比为 a_{ij} , 那么元素 j 和元素 i 的重要性相比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

Step 3 层次单排序及一致性检验。对于每一个判断矩阵, 其最大特征值对应的特征向量归一化后即可认为是同一层次各因素相互比较后的相对重要性标度。步骤如下。

(1) 计算一致性指标 CI 。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (14)$$

式中: λ_{\max} 为比较判断矩阵的最大特征值; n 为比较判断矩阵的阶数。

(2) 查找相应的平均随机一致性指标 RI , 其值如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(3) 计算一致性比例 CR 。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (15)$$

通常认为, 当 $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵的一致性可以接受, 否则应对其适当调整。

Step 4 层次总排序及一致性检验。

Step 5 计算各方案的权重指标 ω_2 。

3.3 综合权值

本文在权重确定时, 同时考虑客观因素及主观因素, 不失公正性的同时, 也不忽略决策者的偏好, 采用线性加权的方法来确定应急点重要性权值(综合权值)为

$$\omega = \alpha\omega_1 + (1 - \alpha)\omega_2 \quad (16)$$

式中, α 为客观偏好系数, $(1 - \alpha)$ 为主观偏好系数, $\alpha \in [0, 1]$, 由应急调度决策者根据偏好给出。本文中取 $\alpha = 0.5$, 即认为主观偏好及客观偏好同等重要。

4 电力系统应急物资调度模型求解

多目标优化问题描述如式(17)。

$$\begin{aligned} & \min [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \\ & \text{s.t.} \begin{cases} l_b \leq x \leq u_b \\ A_{\text{eq}} \cdot x = b_{\text{eq}} \\ A \cdot x \leq b \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $f_i(x)$ 为待优化的目标函数; x 为待优化变量; l_b 和 u_b 分别为变量 x 的下限和上限约束; $A_{\text{eq}} \cdot x = b_{\text{eq}}$ 为变量 x 的线性等式约束条件; $A \cdot x \leq b$ 为变量 x 的线性不等式约束条件。

在多目标优化问题中, 往往不能使每一目标函数达到最优, 某一目标函数的提高需要以另一目标函数的降低为代价, 而多目标优化的目的即是寻找 Pareto 最优解^[18]。目前的多目标函数优化算法较多, 遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[19]广泛运用于各个科学领域, 在求解一些复杂优化问题已显示出强大能力, 具有广泛的适应性。为此, 基于遗传算法, 本文使用 Matlab 中的 gamultiobj 函数对提出的两个目标函数进行优化^[20-21]。

5 算例分析

广东省地理位置特殊, 台风灾害频发。台风“彩虹”横扫湛江, 波及范围远至珠三角, 对广东省电力系统造成了严重影响^[22]。

本算例假设电力系统中的节点与地理上的应急点重合。以粤西某局部电力系统为例, 分析该系统在台风“彩虹”下的电力应急物资调度情况。其

中, 电力系统拓扑及参数如图 3 所示, 电力应急物资调度拓扑及部分参数如图 4 所示。假设电力应急物资调度拓扑图中包含 3 个供应点、2 个中转点及 4 个应急点, 并且图 4 中应急点 1、2、3、4 分别与图

3 中节点 1、10、8、5 重合(图 3 中红色节点)。台风“彩虹”过后, 节点 1、5、8、10 的带负荷能力分别下降了 90%、10%、7%、51%^[23]。

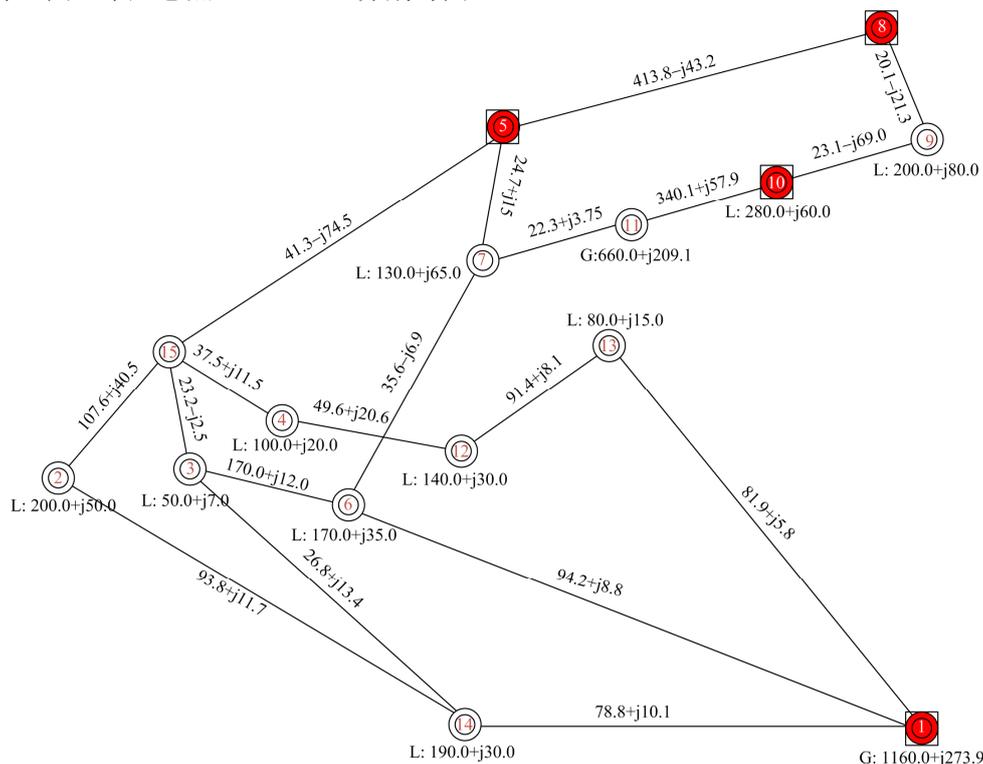


图 3 粤西某局部电力系统拓扑图

Fig. 3 A local power system topology in west Guangdong

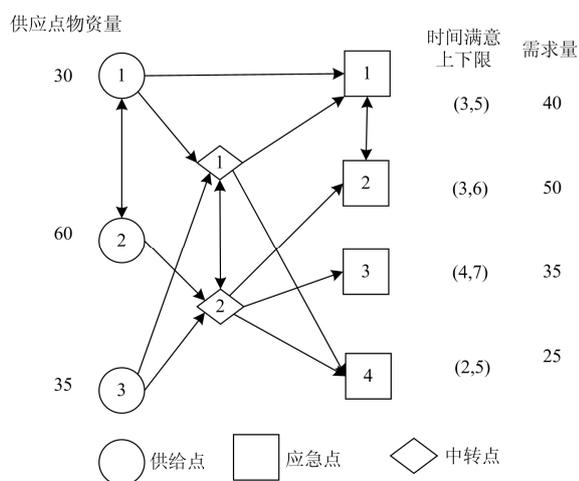


图 4 电力应急物资运输拓扑图

Fig. 4 Electric power emergency supplies transport topology

为简化计算, 节点与节点之间的运输时间用 0~10 之间的整数表示^[24], 并且数值越大, 表示两点之间距离越远, 需更多的时间。各条路径上电力应急物资运输时间如表 3 所示, 对应行表示电力应急

物资发出节点, 对应列表示电力应急物资接收节点, 并且节点 1、2、3 表示供应点, 节点 4、5 表示中转点, 节点 6、7、8、9 表示应急点。运输物资量如表 4 所示。其中, 0 表示两节点间没有物资运输, 空格部分表示所求解的未知量, 如表 4 所示, 共有 40 个未知量。

表 3 电力应急物资运输时间

Table 3 Transport time of electric power emergency materials

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	1	2	4	5	5	1
2	0	0	0	3	3	5	4	6	3
3	0	0	0	4	2	6	2	3	6
4	0	0	0	0	3	2	5	3	5
5	0	0	0	3	0	6	3	6	3
6	0	0	0	0	0	0	4	5	3
7	0	0	0	0	0	4	0	3	3
8	0	0	0	0	0	5	3	0	4
9	0	0	0	0	0	3	3	4	0

表 4 物资运输量

Table 4 Material transport volume

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0						
2	0	0	0						
3	0	0	0						
4	0	0	0	0					
5	0	0	0		0				
6	0	0	0	0	0	0			
7	0	0	0	0	0		0		
8	0	0	0	0	0			0	
9	0	0	0	0	0				0

算例流程图如图 1 所示，首先基于客观因素及主观因素分析求取应急点重要性权值，然后基于该权值进行多目标函数优化。

1) 应急点重要性权值确定

使用 AHP 计算各节点重要性指标时，如图 5 所示，目标层设定为电力物资调度最优，准则层考虑的因素分别为负荷损失 C1、负荷类型 C2、经济损失 C3 及所处位置 C4(认为其地理位置距离台风路径越近，则节点重要性越强)，决策层为各应急点。并且本文中客观偏好系数 $\alpha=0.5$ 。各节点重要性指标计算结果如表 5 所示。表中， $D_{e,i}$ 表示节点 i 的电气耦合连接度； ΔV_i 表示节点 i 的电压变化率； ω_{1i} 表示节点 i 的客观因素权值； ω_{2i} 表示节点 i 的主观因素权值； ω_i 表示节点 i 的综合权值。

由表 5 可知，根据客观因素(节点电气耦合连接度、节点电压变化)计算，节点 10 的重要性权值最大，节点 1 的重要性权值处于第三位；根据主观因素计算，节点 1 的重要性权值最大，节点 10 次之。综合考虑客观因素和主观因素，计算得节点 1 的重

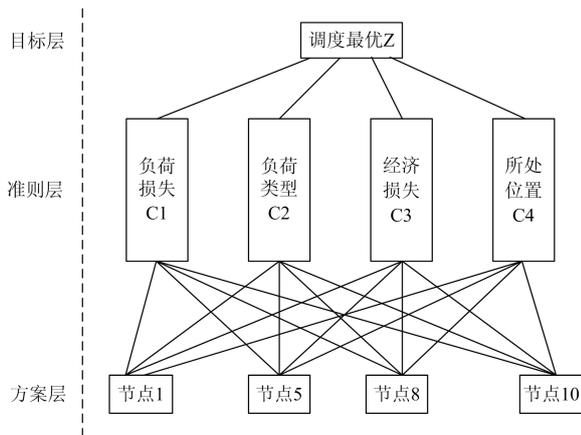


图 5 AHP 结构图

Fig. 5 AHP structure diagram

表 5 各节点重要性指标计算结果

Table 5 Calculation results of the importance

	index for each node			
节点 i	1	5	8	10
$D_{e,i}$	0.295 9	0.109 2	0.259 9	0.335 0
ΔV_i	0.227 0	0.067 2	0.377 3	0.465 0
ω_{1i}	0.261 5	0.088 2	0.318 6	0.400 0
ω_{2i}	0.511 6	0.177 0	0.098 3	0.213 1
ω_i	0.388 4	0.132 6	0.208 5	0.306 5

要性权值最大，节点 10 次之，节点 5 重要性权值最小，此重要性权值排序结果较为符合实际情况，既保证了分析结果的公正性，也没有忽略调度决策者的主观经验判断。

2) 基于 1) 的计算结果，对目标函数进行优化。

对本文所提的目标函数利用 Matlab 编程计算，采用 gamultiobj 函数进行优化。由于 gamultiobj 函数优化问题是使目标函数最小化，而本文需求目标函数最大值，故在进行优化前先在目标函数前加上负号。Pareto 最优解如图 6 所示，两个目标函数难以同时达到最优，一个目标函数的增大以损失另一目标函数为代价。

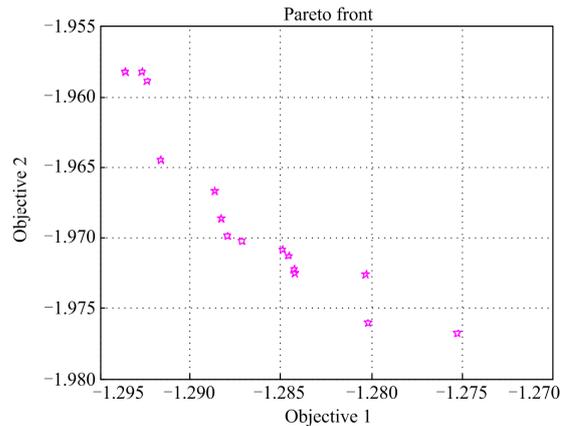


图 6 Pareto 最优解

Fig. 6 Pareto optimal solution

计算仿真所得 20 组 Pareto 最优解绝对值(目标函数值)的均值和方差如表 6 所示。

表 6 各目标函数值的均值和方差

Table 6 Mean value and variance of each objective

	function value	
目标函数	平均值	方差
物资满意度	1.287 0	$2.571 1 \times 10^{-5}$
时间满意度	1.967 9	$3.923 1 \times 10^{-5}$

由表 6 看出,所提方法下物资满意度及时间满意度均值分别为 1.287 0 和 1.967 9,其方差均很小。

为了验证所提方法的有效性,将所得结果与随机指定节点间的运输路径进行比较,取 10 次随机路径进行仿真计算,其计算结果如表 7 所示。

表 7 随机路径下的最优目标函数值

序号	物资满意度	时间满意度
1	1.091 4	0.033 6
2	0.247 4	0.431 4
3	0.094 9	0.455 4
4	0.410 6	0.060 1
5	0.834 2	0.091 7
6	0.586 8	0.105 9
7	0.941 9	1.466 7
8	0	0
9	1.305 3	0.156 2
10	0.146 1	0.005 3
10 次随机路径下平均值	0.565 9	0.280 6
gamultiobj 函数优化平均值	1.287 0	1.967 9

由表 7 和图 7 可知,随机路径下尽管可能使某一目标函数最优值比所提方法下对应目标函数最优值大,但另一目标函数值必然损失较大,不可取;总体来看,所提方法目标函数最优值均比随机路径情况下函数最优值平均值大很多。因此,根据所提的方法进行电力应急物资调度可以满足物资满意度最优及时间满意度最优,验证了所提方法的科学性及其有效性。

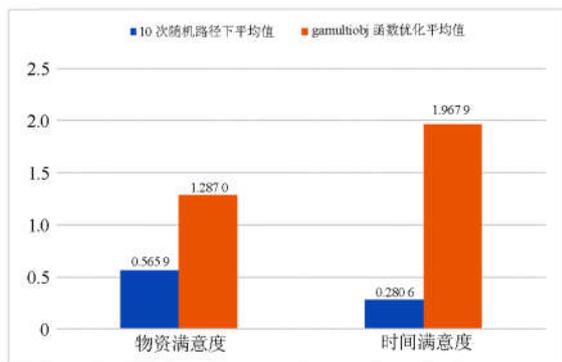


图 7 随机路径与所提方法目标函数值对比

Fig. 7 Comparison of the objective function values under the random path and the proposed method

6 结语

本文提出一种电力应急物资调度模型。首先,将电力应急物资调度问题转化为多目标优化问题,建立以物资满意度和时间满意度为目标的函数;其

次,在目标函数参数(应急点重要性权值)确定中,综合考虑主观因素与客观因素确定应急点权值,既保证结果的客观性,也不忽视应急调度决策者的主观经验判断;最后,通过对粤西某局部电力系统及电力应急物资调度图进行仿真分析,并与随机调度下的结果进行比较,所提目标函数最优值比随机路径情况下的目标函数值大,验证了所提模型的科学性及有效性。

参考文献

- [1] OZDAMAR L, EKINCI E, KUCUKYAZICI B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. Annals of Operations Research, 2004, 129(1): 217-245.
- [2] OZBAY K, XIAO W H, IYIGUN C, et al. Probabilistic programming models for response vehicle dispatching and resource allocation in traffic incident management[D]. Rutgers University, 2004.
- [3] 陈雷雷, 王海燕. 大规模突发事件中基于满意度的应急物资优化调度模型[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(5): 46-52.
CHEN Leilei, WANG Haiyan. Optimal scheduling model for emergency logistics based on satisfaction under large-scale emergencies[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(5): 46-52.
- [4] 霍达, 吴耀华. 基于地区特性的应急物资分类研究[J]. 物流技术, 2010(16): 11-13.
HUO Da, WU Yaohua. Categorization of emergency materials based on local characteristics[J]. Logistics Technology, 2010(16): 11-13.
- [5] 陈明天. 突发自然灾害救灾物资分配优化决策研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
CHEN Mingtian. Optimization of relief supply allocation decision under unconventional natural disasters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [6] 戴更新, 达庆利. 多资源组合应急调度问题的研究[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(9): 52-55.
DAI Gengxin, DA Qingli. The study of combinatorial scheduling problem in emergency systems[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2000, 20(9): 52-55.
- [7] 俞武扬. 基于时间满意度的应急物资中转运输模型[J]. 系统管理学报, 2013, 22(6): 882-887.
YU Wuyang. Transshipment model for emergency materials based on time satisfaction criterion[J]. Journal of Systems & Management, 2013, 22(6): 882-887.
- [8] 陈莹珍, 赵秋红. 基于公平原则的应急物资分配模型与算法[J]. 系统工程与理论实践, 2015, 35(12): 3065-3073.
CHEN Yingzhen, ZHAO Qiuhong. The model and

- algorithm for emergency supplies distribution based on fairness[J]. *Systems Engineering-theory & Practice*, 2015, 35(12): 3065-3073.
- [9] 刘艳, 顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(10): 20-27.
LIU Yan, GU Xueping. Node importance assessment based skeleton-network reconfiguration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(10): 20-27.
- [10] 王凯. 基于复杂网络理论的电网结构复杂性和脆弱性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
WANG Kai. Research on structural complexity and vulnerability of power grids based on complex network theory[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [11] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(2): 1-4.
- [12] KINNEY R, CRUCITTI P, ALBERT R, et al. Modeling cascading failures in the North American power grid[J]. *The European Physical Journal*, 2005, 46(1): 101-107.
- [13] 陈碧云, 叶仁欢, 白晓清. 计及输电介数及功率介数的电网待恢复区域重要性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(6): 141-147.
CHEN Biyun, YE Renhuan, BAI Xiaoqing. Importance evaluation of electric power areas to be restored considering electricity transmission betweenness and power betweenness[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(6): 141-147.
- [14] 谭玉东, 李欣然, 蔡晔, 等. 基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 146-152.
TAN Yudong, LI Xinran, CAI Ye, et al. Critical node identification for complex power grid based on electrical distance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 146-152.
- [15] 刘文颖, 梁才, 徐鹏, 等. 基于潮流介数的电力系统关键线路辨识[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 90-99.
LIU Wenying, LIANG Cai, XU Peng, et al. Identification of critical line in power systems based on flow betweenness[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(31): 90-99.
- [16] 曹煜, 郭创新, 章禹, 等. 计及无功潮流影响的传输介数概念及其电网关键线路辨识研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(23): 9-16.
CAO Yu, GUO Chuangxin, ZHANG Yu, et al. Study of the concept of transmission betweenness considering the effect of reactive power flow and its application in identification of critical lines in power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(23): 9-16.
- [17] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析一熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(1): 28-34.
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis—entropy weight method[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 28-34.
- [18] 李智欢, 段献忠. 多目标进化算法求解无功优化问题的对比分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(10): 57-65.
LI Zhihuan, DUAN Xianzhong. Comparison and analysis of multiobjective evolutionary algorithm for reactive power optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(10): 57-65.
- [19] 汤晓青, 刘辉. 基于改进多目标遗传算法的实时发电市场优化调度研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(17): 65-71.
TANG Xiaoqing, LIU Hui. Analysis of the optimal dispatch in real-time generation market using an improved multi-objective genetic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(17): 65-71.
- [20] PATTANAIK J K, BASU M, DASH D P. Review on application and comparison of metaheuristic techniques to multi-area economic dispatch problem[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 40-56. DOI: 10.1186/s41601-017-0033-5.
- [21] 郁磊, 史峰, 王辉, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 105-117.
- [22] 彩虹分析报告[R]. 广州: 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 2015.
- [23] 广东电网防台风“彩虹”因灾损失表[R]. 广州: 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 2015.
- [24] LU Chaorong, LI Lexi, SUN Jian, et al. Emergency transportation model of logistic material based on time-satisfaction[C] // *Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, May 25-27, 2012, Zhangjiajie, China: 785-788.

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-11-09

作者简介:

侯 慧(1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统恢复策略研究; E-mail: houhui@whut.edu.cn

耿 浩(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统恢复策略研究. E-mail: whutgenghao@163.com

(编辑 周金梅)