防灾应急电源优化调度的机会约束规划方法

韩 畅[1],梁博森[1],林振智[1],文福拴[1,2],易仕敏[3]
(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;
2. 文莱科技大学 电机与电子工程系,文莱 斯里巴加湾 BE1410;
3. 广东电网有限责任公司,广东 广州 510620)

摘要:在电力系统防灾应急体系中,需要合理调度防灾应急电源,以最大限度地降低停电损失。在实际停电事故发生时,调度环境非常复杂且具有很多不确定性因素,而现有防灾应急电源优化调度方面的研究大多未计及多重不确定性因素的影响。在此背景下,假定应急电源的行驶时间近似服从正态分布,失电用户的缺电功率近似服从区间均匀分布,在此基础上建立基于机会约束规划的防灾应急电源优化调度模型。该模型以重要失电用户的总停电损失最小为优化目标,采用置信水平处理模型中的不确定参数,并在量子进化算法中嵌入蒙特卡洛仿真来求解。算例分析结果表明所提方法可以处理电力应急过程中的多重不确定性因素,合理分配防灾应急电源,进而降低停电损失。

关键词:防灾应急电源;优化调度;机会约束规划;量子进化算法;蒙特卡洛仿真
中图分类号:TM 73 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.020

0 引言

电能是现代社会赖以生存的主要能源形式,供电可靠对社会安全与经济发展有着举足轻重的作用。近年来,国内外发生了一系列大停电事故,如2008 年初冰灾导致的我国南方大停电、2012 年印度的 730 大停电以及 2015 年广东湛江电网的大停电等。这些停电事故造成了严重的经济损失和社会影响,而重要电力用户如医院、政府机关等的损失在停电总损失中占有较高比例[1]。因此,在电力应急管理中,建立健全有效的应急供电措施,优先确保重要用户的供电安全十分重要[2]。

防灾应急电源可以保证重要负荷在供电中断时尽快恢复运行,是确保重要用户可靠供电的有效措施。考虑到防灾应急电源造价昂贵、容量有限,因此有必要对其进行优化调度,将各供电所的应急电源合理经济地分配给重要失电用户,减小停电损失。国内外关于防灾应急资源优化调度已有相关研究。文献[3]根据外部环境、网络状况、用户需求、企业情况这 4 类指标,提出了一种城市应急能力的综合评价体系。针对应急资源调配问题,文献[4]构建了应对自然灾害的防灾应急物资调配模型,并将该模型解耦成多商品网络流问题,基于拉格朗日松弛法求解应急车的最优调配方案。针对应急服务点的选址问题,文献[5]和文献[6]分别考虑停电风险和应急总成本,建立了电力应急服务点的选址优化模型。针对应急电源的配置和调度,文献[7]考虑用户的分布和需求,建立了新增应急电源总费用最小的应急电源优化配置模型。文献[8]提出了负荷重要性定性分析的方法,根据负荷的重要性来分配应急电源。文献[9]考虑用户需求和供电所到用户的距离,建立了主目标为总停电损失最小、次目标为移动应急电源富余容量最小的双目标优化调度模型。文献[10]根据停电时间的预测结果对大停电进行分级,确定电力应急响应的级别,建立了应急电源的多目标优化配置模型。文献[11]利用多约束优化解决应急电源接入点的问题,给出多台移动应急电源联合应急的方案制定方法。近年来随着电动汽车的发展,关于 V2G(Vehicle to Grid)模式下的防灾应急电源优化调度的研究也较多。文献[12]考虑电动汽车随机分散的特点,基于模糊 *K*-means 算法提出了电动汽车紧急聚集为电力应急电源的优化策略。综上所述,现有关于防灾应急电源优化调度的研究大多是将应急电源从供电所到失电用户的行驶时间、重要失电用户的缺电功率视为定值,通过建立确定性的优化模型进行求解。然而,灾害发生时调度环境复杂多变,受路况、天气等因素的影响,防灾应急电源的行驶时间是不确定的。文献[13]在考虑灾害后不同运输路径可靠性的基础上,建立了电力应急物资配送路线优化模型。文献[14]对应急电源在行驶过程中的不确定性进行了模拟,将各条路径上的行驶时间设为区间数,建立了应急电源从应急中心到达失电用户的行驶路径优化模型,但该模型只用于确定行驶路径,没有涉及不确定环境下应急电源的分配问题。另一方面,在停电事故发生

收稿日期:2017-03-23;**修回日期**:2017-11-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377005);国家重点研发计划项目(2016YFB0900105);浙江省自然科学基金资助项目(LY17E070003)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51377005), National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900105) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LY17E070003)

时,由于电网用户众多,调度部门难以准确获得各失电用户的实际缺电功率;而且受停电时间段、用户特性等因素的影响,需要恢复供电的用户缺电功率也是不确定的。因此,现有的防灾应急电源优化调度模型难以适应复杂多变的环境,无法很好地满足防灾应急电源优化调度的实际需求。

上述背景下,亟需建立能够考虑多重不确定因素的防灾应急电源优化调度模型。本文假定应急电源行驶时间近似服从正态分布,重要失电用户的缺电功率近似服从区间均匀分布,在此基础上建立基于机会约束规划的防灾应急电源优化调度模型。

1 防灾应急电源优化调度模型

1.1 机会约束规划概述

机会约束规划主要用于解决目标函数和约束条件含不确定参数,且必须在不确定参数明确前做出决策的优化问题。对含有不确定参数的数学规划模型:

$$\begin{aligned}&\min f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\varepsilon})\\&\text{s.t.}\quad g_v(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\varepsilon})\leqslant 0\quad v=1,2,\cdots,s\end{aligned}\tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{x}$ 为决策变量;$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为不确定参数;$g_v(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\varepsilon})$ 为第 v 个约束条件;s 为约束条件数量。目标函数 $f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\varepsilon})$ 和约束条件 $g_v(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\varepsilon})\leqslant 0$ 是不确定的。考虑到决策在一定程度上不能够满足约束条件,采用“软约束”,当决策使约束条件成立的概率高于某一置信水平即可。机会约束规划方法将之转换为下述优化模型[15-16]:

$$\begin{aligned}&\min \bar{f}\\&\text{s.t.}\quad \begin{aligned}&P\{f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\varepsilon})\leqslant \bar{f}\}\geqslant\alpha\\&P\{g_v(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\varepsilon})\leqslant 0,v=1,2,\cdots,s\}\geqslant\beta\end{aligned}\end{aligned}\tag{2}$$

其中,$\bar{f}$ 为目标函数值,即目标函数 $f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\varepsilon})$ 在保证置信水平至少为 α 时所取的最小值;P 为事件成立的概率;α、$\beta\in[0,1]$ 分别为目标函数及约束条件成立的置信水平。

1.2 基于机会约束规划的防灾应急电源优化调度模型

常见的防灾应急电源一般指移动发电车,如柴油发电车和磁悬浮飞轮储能发电车,其价值在于减小失电用户的停电损失。停电损失不仅和停电时间、缺电功率有关,还与用户类型有关。引入重要性来定性评估不同失电用户的地位。重要性越高的用户,其单位停电损失越大,应越快恢复其供电。计算用户的重要性时,现有的研究多采用影响因子 a、b 分别表示用户失电后对生命安全、经济效益的影响程度,用 c 表示用户的特殊性[8],数值越大表示用户越重要。用 ω_a、ω_b 和 ω_c 分别表示在不同评价体系中影响因子所占的比重,并满足 $\omega_a+\omega_b+\omega_c=1$[9]。因此,用户 j 的重要性 A_j 可表示为:

$$A_j=\omega_a a_j+\omega_b b_j+\omega_c c_j\tag{3}$$

用户的停电损失一般采用经济损失来定量评价[17]。以峰荷时刻的停电损失为基准,调查各类用户的停电损失,并将各类用户的停电损失进行加权处理,统一表示为综合用户。利用综合用户的停电损失函数来表示停电损失和停电持续时间的关系,从而确定综合用户单位时间、单位功率负荷的基本停电损失值 S[18-19]。因此,用户 j 的单位停电损失 S_j 可根据基本停电损失值和用户重要性来衡量,其表达式为:

$$S_j=SA_j=S(\omega_a a_j+\omega_b b_j+\omega_c c_j)\tag{4}$$

首先,对失电用户进行重要性分析,初步筛选出重要失电用户,并计算其单位停电损失。假设某区域有 m 个供电所、n 个失电用户、q 种应急电源;S_j 表示第 $j(j=1,2,\cdots,n)$ 个重要失电用户的单位停电损失,p_k 表示第 $k(k=1,2,\cdots,q)$ 种应急电源的容量,x_{ijk} 表示第 $i(i=1,2,\cdots,m)$ 个供电所向第 j 个用户提供的第 k 种应急电源的数量;t_{av} 为根据历史数据得到的某城市区域的平均停电时间;t_0 为应急电源接到调度指令而反应动作的响应时间,一般为确定值;$t_{j\text{late}}$ 为最晚到达用户 j 的应急电源行驶时间。

在实际停电事故发生时,不同用户的用电特性不同,对供电要求也不同;且由于失电用户可能很多,调度部门获得各用户的具体缺电功率比较困难,实际中可根据失电用户的历史负荷数据来预测缺电功率。参照文献[20],本文假设各个重要失电用户的缺电功率 $\bar{p}_j$ 近似服从区间均匀分布,即 $\bar{p}_j=[p_{j\text{d}},p_j]$;区间端点 $p_{j\text{d}}$ 和 p_j 的具体数值可根据历史用电数据来预估。此外,发生不同的灾情时,应急电源的行驶时间可能存在明显差异,而文献[21]研究发现路径行驶时间近似服从对数正态分布。根据中心极限定理,大量随机变量积累分布逐点收敛到正态分布[22],因此可假定应急电源从第 i 个供电所到第 j 个失电用户的行驶时间 $\bar{t}_{ij}$ 近似服从正态分布,即用期望值和方差来描述[23]。根据实时地理信息系统 GIS(Geographic Information System)以及相关外部信息(如百度地图、高德地图等),可估算出移动应急电源在各条路径上的大致行驶时间,将其作为正态分布的期望值,并根据停电期间的实际路况确定方差值。若路况复杂,行驶时间可能的波动范围大,可通过设置不同方差值来模拟行驶时间的不确定性程度。

因此,可以建立以总停电损失最小为目标的优化模型:

$$\begin{aligned}\min f=&\sum_{j=1}^{n}S_j p_j t_{\text{av}}-\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{q}S_j x_{ijk}p_k(t_{\text{av}}-\bar{t}_{ij}-t_0)+\\&\sum_{j=1}^{n}S_j(t_{\text{av}}-t_{j\text{late}}-t_0)\max\Big(\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q}x_{ijk}p_k-p_j,0\Big)\end{aligned}\tag{5}$$

式中第一项表示不恢复供电时所有重要失电

用户的停电损失;第二项表示第 i 个供电所向第 j 个重要失电用户供电后所能弥补的停电损失;第三项为应急电源富余容量多计入的所弥补的停电损失。

该模型还需满足如下约束条件。

a. 第 i 个供电所提供的第 k 种应急电源数量应不超过供电所现有的该类应急电源总数 y_{ik},即:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ijk} \leqslant y_{ik} \quad i=1,2,\cdots,m;k=1,2,\cdots,q \tag{6}$$

b. 对第 j 个重要失电用户,供电所提供的应急电源功率应不小于该用户的缺电功率;否则不恢复供电。实际应用中,若根据历史数据预测出第 j 个重要用户在该停电时刻的缺电功率期望值很大,应急电源容量无法满足其需求,可与该用户联系,选取其缺电功率中的重要负荷进行供电。通过引入变量 z_j 来表示是否恢复第 j 个用户的供电,$z_j=1$ 表示恢复供电,$z_j=0$ 表示不恢复,从而确保模型有可行解。

$$z_j=\begin{cases}1 & \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} x_{ijk}p_k \geqslant \overline{p_j} \\ 0 & \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} x_{ijk}=0\end{cases} \quad j=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

综上,为了计及防灾应急电源行驶时间、重要用户缺电功率的不确定性,建立如下的防灾应急电源的机会约束规划优化调度模型[24]:

$$\begin{cases}\min \bar{f} \\ \text{s.t.} \quad P\Big\{\sum_{j=1}^{n} S_j p_j t_{\text{av}} - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} S_j x_{ijk} p_k (t_{\text{av}} - \bar{t}_{ij} - t_0) + \\ \sum_{j=1}^{n} S_j (t_{\text{av}} - t_{j\text{late}} - t_0)\max\Big(\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} x_{ijk}p_k - p_j, 0\Big) \leqslant \bar{f}\Big\} \geqslant \alpha \\ z_j=\begin{cases}1 & P\Big\{\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} x_{ijk}p_k \geqslant \overline{p_j}\Big\} \geqslant \beta \\ 0 & \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} x_{ijk}=0\end{cases} \quad j=1,2,\cdots,n \\ \sum_{j=1}^{n} x_{ijk} \leqslant y_{ik} \quad i=1,2,\cdots,m;k=1,2,\cdots,q\end{cases} \tag{8}$$

2　防灾应急电源优化调度模型求解算法

量子进化算法采用量子比特编码,求解组合优化问题时比传统进化算法具有更优的性能。蒙特卡洛仿真法以概率统计理论为基础对随机变量进行抽样,从而把不确定性优化问题转化为确定性优化问题求解,在电力系统可靠性分析等领域中得到了广泛的应用[25]。这里采用在量子进化算法中嵌入蒙特卡洛仿真来求解式(8)所描述的优化模型,求解流程如图 1 所示。图 1 中,L_{1a} 和 L_{2b} 为蒙特卡洛仿真次数。蒙特卡洛算法和量子进化算法的细节可分别参见文献[26]和[27],这里不再赘述。

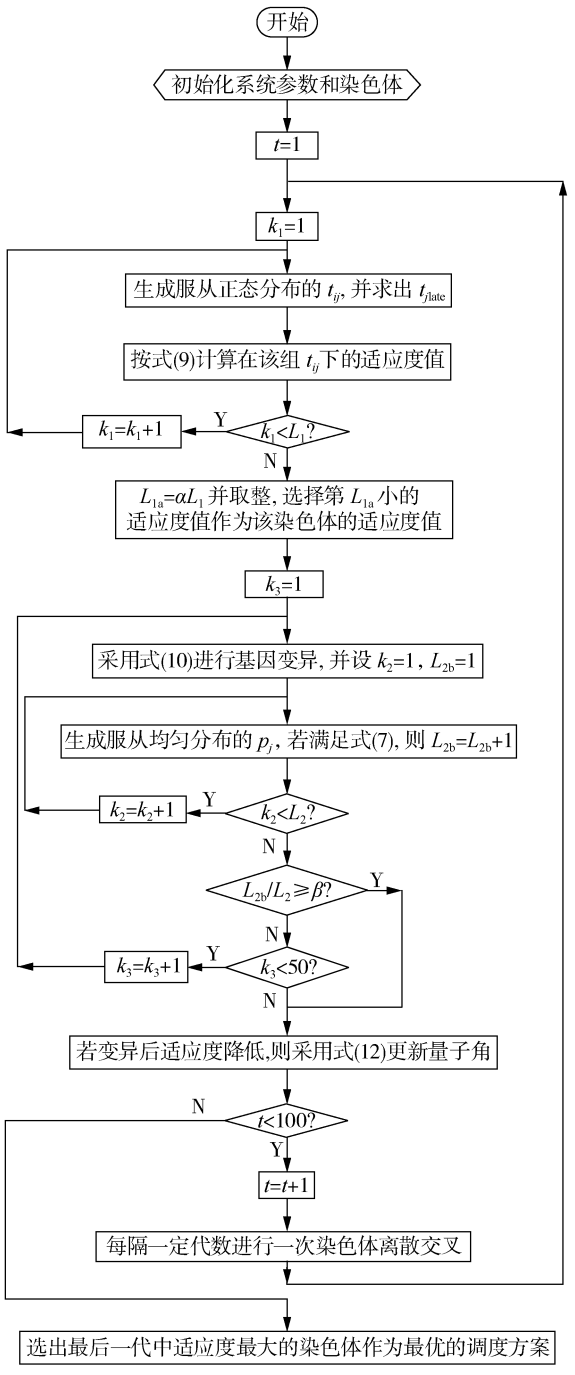

图 1　防灾应急电源优化调度的流程图

Fig.1　Flowchart of optimal scheduling for emergency power sources

对于式(8)所描述的防灾应急电源优化调度问题的优化模型,构造相应的量子进化算法的适应度函数和变异函数分别如式(9)和式(10)所示。

$$F(\bar{f}) = 1/\Big[\sum_{j=1}^{n} S_j p_j t_{\text{av}} - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} S_j x_{ijk} p_k (t_{\text{av}} - \bar{t}_{ij} - t_0) + \sum_{j=1}^{n} S_j (t_{\text{av}} - t_{j\text{late}} - t_0)\max\Big(\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q} x_{ijk}p_k - p_j, 0\Big)\Big] \tag{9}$$

$$z_{er}^{t+1} = \begin{cases} z_{er}^{t} + C_{\text{a}}(z_{er}^{t} \times \text{N}(0, \sin^2\theta_{er}^{t})) & s_{\text{a}} < s_{\text{w}} \\ z_{er}^{t} + C_{\text{a}}(z_{er}^{t} \times \text{N}(0, \cos^2\theta_{er}^{t})) & s_{\text{a}} \geqslant s_{\text{w}} \end{cases} \tag{10}$$

其中，t 为进化代数；z_{er}^{t} 为量子染色体的整数分支，表示第 t 代进化的种群中第 e 条染色体上的第 r 位基因；s_a 为[0,1]范围内均匀分布的随机数；s_w 为变异概率；C_a 表示对数值四舍五入取整数；$N(\mu,\sigma^2)$ 为期望值为 μ、标准差为 σ 的正态分布。若 z_{er}^{t+1} 的数值超出失电用户的范围 0~n（$z_{er}^{t+1}=n$ 表示应急电源向第 n 个用户供电，$z_{er}^{t+1}=0$ 表示应急电源不向任何用户供电），按式(11)处理：

$$z_{er}^{t+1}=\begin{cases}2n-z_{er}^{t+1} & z_{er}^{t+1}>n\\ z_{er}^{t+1}=-z_{er}^{t+1} & z_{er}^{t+1}<0\end{cases} \tag{11}$$

为引导进化朝向期望的方向，采用量子旋转门更新量子角 θ_{er}^{t+1}：$\theta_{er}^{t+1}=\theta_{er}^{t}+\Delta\theta_{er}^{t}$。旋转角 $\Delta\theta_{er}^{t}$ 采用下式确定[28]：

$$\Delta\theta_{er}^{t}=\theta_{er}^{1}\times f_{\mathrm{sgn}}(\cos\theta_{er}^{t}\sin\theta_{er}^{t})\times e^{-|\sin\theta_{er}^{t}|/(|\cos\theta_{er}^{t}|+\gamma)} \tag{12}$$

其中，θ_{er}^{t} 为第 t 代进化的种群中第 e 条染色体上的第 r 位基因的量子角；θ_{er}^{1} 为初始旋转角；f_{sgn} 为符号函数，用于控制旋转方向；γ 为旋转尺度，用于控制收敛速度。

3 算例分析

某城市区域有 3 个分区供电所，其防灾应急电源容量如表 1 所示。这些防灾应急电源为经初步筛选后的 10 个重要失电用户提供应急服务。这 10 个重要用户的缺电功率、各供电所到各重要用户所需行驶时间，以及根据式(4)和各用户的重要性不同而给定的用户单位停电损失费用列于表 2。假设平均停电时间为 60 min，调度响应时间为 2 min。

表 1 各分区供电所的应急电源类型及数量

Table 1 Types and quantities of emergency power sources in each power station

供电所编号	发电车数量		
	200 kW	110 kW	50 kW
1	3	2	1
2	0	3	2
3	3	2	0
总计	6	7	3

设立对照组来分析不确定性参数对防灾应急电源优化调度模型的影响，进而验证其有效性。根据表 1 和表 2 中应急电源容量和用户信息，取置信水平 $\alpha=0.9$、$\beta=0.9$，在量子进化算法中嵌入蒙特卡洛仿真求解所构造的优化模型，并针对 4 组情况求解。其中，第一组考虑了应急电源行驶时间和用户缺电功率的不确定性；第二组将行驶时间和缺电功率视为确定值来进行应急电源优化调度，以比较所提出的模型与已有的确定性模型的区别；第三组改变行驶时间的正态分布参数，来模拟路况的不确定性对调度方案的影响；第四组改变缺电功率的区间分布参数，来模拟负荷预测结果对调度方案的影响。

a. 第一组：求解所构造的优化模型，得到调度结果如表 3 所示，表中的用户按单位停电损失由高到低排序。从表 3 可以看出，由于应急电源容量有限，调度方案优先向重要性（单位停电损失）高的重要用户供电，单位停电损失较小的用户 7 和用户 1 没能恢复供电；以缺电功率上限来计算应急电源富余容量，其仅为 10 kW，这说明各分区供电所的应急电源得到了充分利用。取缺电功率为区间均匀分布的上限，行驶时间为正态分布的期望值；若不使用防灾应急电源，计算所得总停电损失为 289.46 万元，而在该应急电源调度方案下的停电损失为 51.99 万元，故使用防灾应急电源能有效减小停电损失。与文献[9]的结果相比，本文所建立的模型不仅考虑了不确定性因素的影响，还适用于供电所应急电源容量不足的情形。

表 2 重要用户的缺电功率、各供电所到各重要用户所需时间以及单位停电损失费用

Table 2 Capacity of each important load, time required from each power station to each load location, and unit interruption cost of each important load

重要用户编号	名称	缺电功率分布	行驶时间分布			单位停电损失/[元·(kW·min)$^{-1}$]
			供电所 1	供电所 2	供电所 3	
1	学校	U(120,150)	N(7.5,2)	N(1.5,0.5)	N(3,1)	10.08
2	科研机构	U(50,60)	N(5,0.5)	N(8,1)	N(12.5,2)	8.05
3	医院	U(198,200)	N(2,0.5)	N(5,0.5)	N(9.5,0.7)	33.48
4	政府办公	U(105,115)	N(9,1)	N(6,0.5)	N(8.5,1.5)	8.05
5	电视台	U(110,115)	N(8.5,1)	N(1.5,0.2)	N(3,0.7)	16.08
6	商业中心	U(300,335)	N(14,2)	N(7,0.5)	N(4.5,0.7)	10.74
7	网通公司	U(29,30)	N(10.5,1)	N(3.5,0.5)	N(1,0.2)	10.74
8	大型工厂	U(490,525)	N(7.5,3)	N(10.5,2)	N(6,0.7)	16.08
9	地铁系统	U(450,460)	N(11,1)	N(13,1)	N(14.5,3)	28.03
10	军事重地	U(340,350)	N(12.5,2)	N(9,1)	N(10.5,1.5)	30.62

注：均匀分布参数单位为 kW，正态分布参数单位为 min，后同。

b. 第二组:取行驶时间为其正态分布的期望值,缺电功率为区间分布的上限值,模型可由式(5)—(7)组成,求得的优化调度结果如表 4 所示。该应急电源调度方案的停电损失为 58.09 万元,应急电源富余容量为 135 kW。与表 3 的结果相比,新增了用户 4 和用户 2 没有恢复供电,用户停电损失和应急电源富余容量都有所增加。这是因为在确定性模型中采用了“硬约束”,要求供电所提供的应急电源必须满足缺电功率的需求,且缺电功率由原来的区间分布变成了确定值;但应急发电车的容量规格有限,无法较好地匹配用户缺电功率的需求。事实上,在实际调度过程中无法事先准确估计应急电源行驶时间和失电用户缺电功率。因此,在行驶时间和缺电功率与期望值相差较大的情况下,采用确定性优化模型得到的调度方案无法根据偏差情况进行调整。

c. 第三组:如在上、下班高峰时发生停电,通过加大行驶时间的方差来模拟路段的拥堵。当供电所 1 到用户 9 的道路比较拥堵时,可以根据拥堵程度将其行驶时间分布 N(11,1)调整为另一个值,如 N(11,6)。在这种情况下得到调度结果如表 5 所示。与表 3 结果相比,该场景下的应急电源优化调度方案避开了行驶时间波动大的路径,即用户 9 不再由供电所 1 提供应急电源,转而由其他供电所供电;这是因为用户 9 的单位停电损失大,需要优先保障对该用户的供电。此外,比较这 2 种情形下的优化调度结果可以看出:随着行驶时间的波动增大,调度方案也随之发生变化,计算得停电损失增加 2.09 万元;调度方案的总体变化趋势为尽量避开行驶时间波动大的路径,选择波动小的路径,进而实现停电损失最小的目标。所构造的模型能根据行驶时间的波动(方差)来调整调度方案,因而对复杂环境的适应性更强。

d. 第四组:增大用户 8、用户 6 和用户 1 的缺电功率区间(即减小区间下限),求得的调度结果如表 6 所示。与表 3 结果相比,由于缺电功率区间下限减小,原本向用户 6 提供 110 kW 发电车的供电所 2 转而向用户 1 供电。这是因为用户 6 和用户 1 的重要度接近,而用户 1 比用户 6 距离供电所 2 更近,为尽可能多地减小停电损失,故转而向用户 1 供电。经计算可得停电损失为 51.77 万元,该停电损失相对于表 3 略有减小。因此区间下限越小,即区间范围越大,调度空间越大,停电损失反而越小。另一方面,用户 8 的缺电功率下限虽有所减小,但调度方案仍对用户 8 恢复了 510 kW 的功率;这是因为用户 8 的重要性程度高,因此在实际调度中为尽最大限度地减小停电损失,应尽量满足其用电需求。

表 3　基于机会约束规划的应急电源优化调度结果

Table 3　Optimal scheduling results of emergency power sources based on chance-constrained programming

重要用户编号	缺电功率	单位停电损失/[元·(kW·min)$^{-1}$]	应急电源容量/kW		
			供电所 1	供电所 2	供电所 3
3	U(198,200)	33.48	200		
10	U(340,350)	30.62		110+50	200
9	U(450,460)	28.03	200×2+50		
8	U(490,525)	16.08	110		200×2
5	U(110,115)	16.08		110	
4	U(105,115)	15.05	110		
6	U(300,335)	10.74		110	110×2
7	U(29,30)	10.74			
1	U(120,150)	10.08			
2	U(50,60)	8.05		50	

表 4　没有考虑不确定性因素时的应急电源优化调度结果

Table 4　Optimal scheduling results of emergency power sources without considering uncertainties

重要用户编号	缺电功率/kW	单位停电损失/[元·(kW·min)$^{-1}$]	应急电源容量/kW		
			供电所 1	供电所 2	供电所 3
3	200	33.48	200		
10	350	30.62		110+50	200
9	460	28.03	200×2+110		
8	525	16.08	110		200+110×2
5	115	16.08		110+50	
4	115	15.05			
6	335	10.74	50	110	200
7	30	10.74			
1	150	10.08			
2	60	8.05			

表5 行驶时间波动加大后的优化调度结果

Table 5 Optimal scheduling results with increased fluctuations of traveling time

重要用户编号	缺电功率分布	单位停电损失/[元·(kW·min)$^{-1}$]	应急电源容量/kW		
			供电所1	供电所2	供电所3
3	U(198,200)	33.48	200		
10	U(340,350)	30.62		110+50	200
9	U(450,460)	28.03		110×2+50	200
8	U(490,525)	16.08	200×2+110		
5	U(110,115)	16.08			110
4	U(105,115)	15.05	110		
6	U(300,335)	10.74			200+110
7	U(29,30)	10.74			
1	U(120,150)	10.08			
2	U(50,60)	8.05	50		

表6 缺电功率波动加大后的优化调度结果

Table 6 Optimal scheduling results with increased fluctuations of outage power

重要用户编号	缺电功率分布	单位停电损失/[元·(kW·min)$^{-1}$]	应急电源容量/kW		
			供电所1	供电所2	供电所3
3	U(198,200)	33.48	200		
10	U(340,350)	30.62		110+50	200
9	U(450,460)	28.03	200×2+50		
8	U(350,525)	16.08	110		200×2
5	U(110,115)	16.08		110	
4	U(105,115)	15.05	110		
6	U(100,335)	10.74			110×2
7	U(29,30)	10.74			
1	U(50,150)	10.08		110	
2	U(50,60)	8.05		50	

4 结语

考虑到在实际电力系统防灾应急电源调度过程中存在不确定性因素,在机会约束规划的框架下建立了防灾应急电源优化调度模型。所构建的优化模型以重要失电用户的总停电损失最小为优化目标,计及了多重不确定性因素的影响,采用在量子进化算法中嵌入蒙特卡洛仿真的方法进行求解。算例结果表明,所提出的基于机会约束规划的防灾应急电源优化调度模型可以较好地处理调度过程中的多种不确定性因素,优化分配防灾应急电源,降低停电损失。

在实际防灾应急电源优化调度中,行驶时间不确定性越强,停电损失一般越大;而失电用户的缺电功率区间越大,调度的空间或灵活性就越大,停电损失则越小。因此,为最大限度地减小停电损失,调度部门应获取尽可能精确的交通信息,以减小行驶时间的不确定性;失电用户应提供尽可能大的供电范围,以增大调度机构的调度空间或灵活性。需要指出,不同灾情下的行驶时间可能明显不同,针对防灾应急电源调度中的不确定性因素,如何更准确地确定相关的概率参数取值是仍需要深入研究的重要问题。

参考文献:

[1] ZHOU Limei, FAN Mingtian, ZHANG Zuping. Study on the optimal allocation of emergency power supplies for urban important customers [C]// International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2009). Nanjing, China: [s.n.], 2009: 1-5.

[2] GALUS M D, WARAICH R A, NOEMBRINI F, et al. Integrating power systems, transport systems and vehicle technology for electric mobility impact assessment and efficient control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 938-948.

[3] FAN Mingtian, LIU Sige, ZHANG Zuping. The capability assessment of emergency power supply in urban power network[C]// The 20th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2009). Prague, Czech: [s.n.], 2009: 1-4.

[4] MOHAMMADI S K, HASSANZADEH I, MATHUR R M, et al. A new fuzzy decision-making procedure applied to emergency electric power distribution scheduling[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000, 13(6): 731-740.

[5] 王宏,林振智,文福拴,等. 计及负荷停电风险的电力应急服务的最优选址[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):73-78.
WANG Hong, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Optimal siting of power emergency service station considering outage risk of loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 73-78.

[6] 梁博淼,王宏,林振智,等. 电力系统应急服务多点最优选址规划[J]. 电力系统自动化,2014,38(18):40-45.
LIANG Bomiao, WANG Hong, LIN Zhenzhi, et al. Optimal sitting of power emergency multi-point service provisions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 40-45.

[7] 周莉梅,范明天,张祖平. 基于重要用户的应急电源优化配置

[J]. 电力系统自动化,2007,31(6):99-102.
ZHOU Limei,FAN Mingtian,ZHANG Zuping. Optimal allocation of emergency power supplies for urban important customers[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(6):99-102.
[8] 张爱国,郝建刚,唐志芳,等. 考虑综合负荷重要性的移动应急电源容量优化分配[J]. 电网技术,2008,32(2):86-89.
ZHANG Aiguo,HAO Jiangang,TANG Zhifang,et al. The allocation scheme of mobile emergency generator considering the loads importance[J]. Power System Technology,2008,32(2):86-89.
[9] 王宏,林振智,文福拴,等. 城市移动应急电源的优化调度[J]. 电力系统自动化,2014,38(3):123-129.
WANG Hong, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Optimal scheduling of urban mobile emergency power sources[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(3):123-129.
[10] 区伟健,房鑫炎,俞国勤,等. 考虑时间分级的移动应急电源优化配置模型[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(7):60-66.
QU Weijian,FANG Xinyan,YU Guoqin,et al. Optimal allocation model of mobile emergency supply considering time classification strategy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2015,27(7):60-66.
[11] 倪程捷,房鑫炎,赵文恺,等. 基于图论的移动应急电源孤岛划分及最优接入点搜索[J]. 电力系统自动化,2015,39(6):34-40.
NI Chengjie,FANG Xinyan,ZHAO Wenkai,et al. Island partition in grand optimal connection point search of mobile emergency power source based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(6):34-40.
[12] 赵明宇,徐石明,高辉,等. 基于模糊 *K*-means 算法的电动汽车应急供电策略[J]. 电力系统自动化,2016,40(5):91-95.
ZHAO Mingyu,XU Shiming,GAO Hui,et al. Strategy of electric vehicle emergency power supply based on fuzzy *K*-means algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(5):91-95.
[13] 樊煜坤. 考虑道路可靠性的电力应急物资配送路线优化模型[D]. 北京:华北电力大学,2015.
FAN Yukun. The optimized electricity emergency distribution route model regarding road reliability[D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.
[14] 黄裕春,王宏,文福拴. 含区间数的电力应急网络最优调度路径的确定[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(1):19-25.
HUANG Yuchun,WANG Hong,WEN Fushuan. Determining of optimal scheduling path in power emergency support network represented by interval values[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2015,27(1):19-25.
[15] 杨宁,文福拴. 基于机会约束规划的输电系统规划方法研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(14):23-27.
YANG Ning,WEN Fushuan. Transmission system expansion planning based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(14):23-27.
[16] 任建文,渠卫东. 基于机会约束规划的孤岛模式下微电网动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):73-78.
REN Jianwen,QU Weidong. Dynamic economic dispatch based on chance-constrained programming for islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):73-78.
[17] WACKER G,BILLINTON R. Customer cost of electric service interruptions[J]. Proceedings of the IEEE,1989,77(6):919-930.
[18] 周莉梅,范明天. 城市电网用户停电损失估算及评价方法研究[J]. 中国电力,2006,39(7):70-73.
ZHOU Limei,FAN Mingtian. Research on customer outage cost assessment and its evaluation method in urban electric power network[J]. Electric Power,2006,39(7):70-73.
[19] 李蕊,李跃,苏剑,等. 配电网重要电力用户停电损失及应急策略[J]. 电网技术,2011,35(10):170-176.
LI Rui,LI Yue,SU Jian,et al. Power supply interruption cost of important power consumers in distribution network and its emergency management[J]. Power System Technology,2011,35(10):170-176.
[20] 张弘,朱永佳,范磊磊,等. 基于马尔科夫修正的中长期电力负荷组合区间预测[J]. 华东电力,2013,41(1):33-36.
ZHANG Hong,ZHU Yongjia,FAN Leilei,et al. Mid-long term load interval forecasting based on Markov modification[J]. East China Electric Power,2013,41(1):33-36.
[21] AREZOUMANDI M. Estimation of travel time reliability for freeways using mean and standard deviation of travel time[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2011,11(6):74-84.
[22] 陈守全,林正炎. 随机变量序列函数的几乎处处中心极限定理[J]. 数学物理学报,2008,28(4):747-756.
CHEN Shouquan,LIN Zhengyan. Almost sure central limit theorems for functions of random variables[J]. Acta Mathematica Scientia,2008,28(4):747-756.
[23] 李鑑,谢金星. 分布式配送系统在运输时间正态分布条件下的性能分析[J]. 控制理论与应用,2003,20(3):464-466.
LI Jian, XIE Jinxing. Performance analysis of distributed distribution system under normally-distributed transportation lead-times[J]. Control Theory and Applications,2003,20(3):464-466.
[24] 牛文娟,李扬,王磊. 基于风险评估和机会约束的不确定性可中断负荷优化调度[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):62-67.
NIU Wenjuan,LI Yang,WANG Lei. Optimal dispatch of uncertain interruptible loads based on risk assessment and chance constraint[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):62-67.
[25] 丁明,楚明娟,毕锐,等. 基于序贯蒙特卡洛随机生产模拟的风电接纳能力评价方法及应用[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):67-73.
DING Ming,CHU Mingjuan,BI Rui,et al. Wind power accommodation capability evaluation based on sequential Monte Carlo probabilistic production simulation and its application[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):67-73.
[26] 吴义纯,丁明. 基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价[J]. 电力自动化设备,2004,24(12):70-73.
WU Yichun,DING Ming. Reliability assessment of wind power generation system based on Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(12):70-73.
[27] HAN K H,KIM J H. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(6):580-593.
[28] 高辉,徐光辉,张锐,等. 实数编码量子进化算法[J]. 控制与决策,2008,23(1):87-90.
GAO Hui,XU Guanghui,ZHANG Rui,et al. Real-coded quantum evolutionary algorithm[J]. Control and Decision,2008,23(1):87-90.

作者简介:

韩　畅

韩　畅(1994—),女,贵州毕节人,硕士研究生,主要研究方向为电力应急与电力系统恢复(**E-mail**:hc2399@163.com);

梁博森(1989—),女,辽宁抚顺人,博士研究生,主要研究方向为电力应急与电力系统恢复、电力经济与电力市场(**E-mail**:bomiao.liang@gmail.com);

林振智(1979—),男,福建莆田人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力应急与电力系统恢复(**E-mail**:linzhenzhi@zju.edu.cn);

文福拴(1965—),男,河南林州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车(**E-mail**:fushuan.wen@gmail.com);

易仕敏(1976—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要研究方向为电网调度运行与控制、电网防灾应急、电力科技规划(**E-mail**:157800536@qq.com)。

Chance-constrained programming method for optimal scheduling of emergency power source

HAN Chang[1], LIANG Bomiao[1], LIN Zhenzhi[1], WEN Fushuan[1,2], YI Shimin[3]

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Department of Electrical & Electronic Engineering, Universiti Teknologi Brunei, Bandar Seri Begawan BE1410, Brunei; 3. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: In disaster prevention and emergency support of a power system, the reasonable scheduling of emergency power sources plays an important role in minimizing the outage losses of important customers. The operating condition of a power system is complex and uncertain when power outage occurs. How to properly schedule emergency power sources under multiple uncertain factors has not yet been systematically addressed. Given this background, it is assumed that the traveling time of each emergency power source approximately follows the normal distribution and the outage power of each important customer approximately follows the uniform distribution. An optimal scheduling model of emergency power sources is developed under the well-established chance-constrained programming framework. In the developed optimization model, the objective is formulated as the minimization of the total outage losses of important customers, and the confidence level is adopted to deal with the uncertain parameters. The quantum evolutionary algorithm with the Monte Carlo simulation embedded is employed to solve the optimization model. Case studies show that the proposed scheme can handle multiple uncertain factors in emergency processes, and properly schedule emergency power sources and hence reduce the outage losses.

Key words: emergency power sources; optimal scheduling; chance-constrained programming; quantum evolutionary algorithm; Monte Carlo simulation

(上接第146页 continued from page 146)

Synchronous transmission of signal and power in WPT system based on capacitor modulation

LIU Xiaosheng, GU Xuanpu, YAO Yousu, XU Dianguo

(PEED Laboratory, School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The capacitor modulation of the signal is achieved by modifying the compensation capacitance. Through artificial influence on operation condition of the resonator, the voltage across the coil can be effectively controlled. Through a series of signal processing links, such as step-down dividing voltage, demodulating, filtering, comparing and so on, the transmitting signal is reproduced. The simulative and experimental results demonstrate that the proposed scheme is effective, where the signal can be sent and extracted correctly, and the impact on power transmission is relatively small. In these regards, the synchronous transmission of signal and power in WPT (Wireless Power Transmission) system is realized.

Key words: wireless power transmission; synchronous transmission; capacitor modulation; series compensation; topology