

DOI: 10.7667/PSPC160382

基于不同用户需求的移动应急电源优化配置

杨舒婷¹, 谢宁¹, 王赛一², 华月申²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海市区供电公司, 上海 200080)

摘要: 在智能电网建设的大环境下, 以用户需求指导供电将成为主流。首先建立电力用户的需求指标模型, 提出应急事态下跟用户紧密相关的安全性需求、经济性需求和优质性需求三个需求指标, 以及不同指标的衡量方法。然后建立用户需求满意度最大的移动应急电源优化配置模型。最后以某供电公司的历史数据得到各分区用户的安全性、经济性和优质性等级, 根据所提出的用户需求满意度最大化模型利用混合整数线性规划算法得到移动应急电源的分配方案, 验证了所提模型的可行性、优越性和其指导意义。

关键词: 用户需求; 移动应急电源; 需求满意度; 优化配置

Mobile emergency power optimal configuration based on different users' demand

YANG Shuting¹, XIE Ning¹, WANG Saiyi², HUA Yueshen²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Urban Power Supply Company, Shanghai 200080, China)

Abstract: Under the environment of smart grid construction, it will become a mainstream to supply power based on users' demand. Firstly, this paper establishes the users' demand model and proposes three demand indicators of emergency, including security demand, economy demand, and quality demand. At the same time, it presents the methods to measure different users' demand levels. Then, based on the needs of different users, it proposes emergency power optimization model which aims at maximum users' demand satisfaction. Finally, through solving the optimal configuration by the mixed integer linear programming algorithm, it obtains the configuration scheme of mobile emergency power, verifying the feasibility, superiority and its significance of the proposed model.

Key words: users' demand; mobile emergency power; demand satisfaction; optimal configuration

0 引言

智能电网旨在安全高效地为用户提供足够优质的电能, 是城市发展建设的重要支撑部分^[1-2]。回顾全球各国电力事故历史, 不难发现城市大面积停电事故发生频度并不低。我国 2008 年冰灾导致大面积停电, 给国民生活和国民经济造成巨大的困扰和损失。为此, 重视电力系统应急技术的研究和平台建设是必要的。我国关于应急管理的研究开始较晚, 关于大面积停电的应急处理过程国家电网公司已经有了明文规定和规程^[3], 但是并没有具体实施方案和方法。各省市电力公司已经开始致力于建立自己的应急管理平台^[4], 但是这些研究还处于初始阶段, 不论是制度层面还是技术层面都有待发展和完善。

应急管理分为预防、准备、响应和恢复 4 个阶段, 与之对应的关键技术包括需求预测技术、应急

智能选址技术、资源优化配置技术和应急分析决策技术等^[5]。文献[6]建立大面积停电应急研究框架, 并就大面积停电的理论模型研究其解决算法; 文献[7-8]研究了计及负荷停电风险的电力应急服务的最优选址、城市移动应急电源的优化调度模型以及基于区间数的应急黑启动决策方法; 文献[9]将电动汽车充换电站作为应急电源, 研究利用 V2G 实现应急服务的最小损失方法; 文献[10-11]从应急电源的容量配置现状和重要用户的应急电源需求情况出发, 建立了总费用最小的配置模型, 并采用遗传算法求解; 文献[12]在配电网图模型的基础上, 提出将孤岛划分问题转化为祖先约束背包问题, 利用图论的精确递归法解决。

目前已有文献提出优化方案都是以重要用户停电损失最小为目标, 在智能电网互动用电的大前提下, 无法满足用户与电网公司之间需求与供给间的

准确匹配。需求侧响应是智能电网的重要环节^[13-15]，也是符合科学依据的。为此，本文利用需求来指导供给和配置的思路，来优化移动应急电源的分区配置。首先，建立了电力用户需求指标体系，然后基于不同用户需求建立了用户需求满意度最大模型，最后通过实际的案例，验证和分析了本文所提模型的可行性和所具有的实际意义。

1 电力用户需求指标

构建需求指标体系，首先需要对利益相关者的需求进行全面科学的分析。本文从“停电事故后果”角度出发，构建了与电力用户息息相关的安全性、经济性和优质性 3 个层面的需求指标。

1) 安全性需求

当医院停电，病人的生命安全受到威胁；当党政机关停电，党政机关的机密要害文件可能会丢失；当军事设施停电，国防安全受到威胁；当与电力有关的交通设施、公共场所停电，可能造成公共场所阻塞、公共交通阻塞等公共安全隐患。不论是国家、社会、集体还是个人，停电导致其安全不能得到保护的危害都不是可以用金钱的多少来衡量。简言之，大面积事故停电关系到民族安危、社会稳定、民生安全。另一方面，一些重工业机械设备可能由于停电损害而引起一些关系工厂安全的次生灾害(例如设备突然熄火导致火灾)，有这种倾向的用电单位主要是重工厂或者军工厂。从用户需求侧来看，停电带来的安全性威胁是第一位的，当大型城市电网故障时，安全性需求应急应该放在优先位置。总的来说，安全性需求指用户停电导致人身、失难复得的物件以及家园的安全受到威胁时用户对电力应急的需求。为了衡量不同负荷的安全性需求，建立以下指标集。

① 用户安全事故次数

用户安全事故次数指标体现了用户发生安全事故的频度 λ ，计算方法是在一年内由于停电用户发生安全事故的次数，目前只能通过统计以往的安全事故情况获得。

② 用户安全事故总伤亡人数

用户安全事故总伤亡人数指标体现了用户由于停电事故导致的人员伤亡情况。总伤亡人数记为 N ，由于用户停电会有安全事故隐患的用户单位主要集中在医院、商场、城市交通轨道等。根据这些用户单位以往停电时事故的伤亡人数最高值作为此指标的量化值。

很明显，如果用电单位的停电安全事故频度越高并且其事故总伤亡人数越大，则此用电单位对安

全性需求要求越大，为此用安全性级别来总的衡量用户对安全性的需求的大小，用 M 表示。

$$M = \begin{cases} \lambda \cdot N & \lambda \cdot N < 5 \\ 5 & \lambda \cdot N \geq 5 \end{cases} \quad (1)$$

用户的安全性级别由安全事故次数和安全事故总伤亡人数的乘积决定，不过当其大于等于 5 时，安全性级别取 5。

2) 经济性需求

经济性需求指停电造成严重减产、停工、设备故障等经济性财产损失时用户对应急电力的需求。电力公司的供电用户从用电性质来说可以分为两种，一种为居民用电，另一种为产业用电。居民用电从本质上来说是纯粹消耗电能，而产业用电从一定程度上来说用电的同时也在创造价值，产业用电同时又可分为工业用电和服务业用电，为了衡量用电用户单位的经济性需求，引入用户直接停电损失这个概念。

用户直接停电损失指实际发生停电时直接使用户承担的损失。如果发生停电时，正常生产活动中断了，用户遭受直接停电损失。直接停电损失通常是由未曾预期到的停电的短期效应决定的。目前，计算用户直接停电损失的方法主要有 3 种：间接分析法、针对实际停电事故的估算法、用户调查法。间接分析法是按照单位时间或单位用电量的平均产值水平来计算停电损失；针对实际停电事故的估算法是根据已有大停电事故来间接估计、估算停电损失；用户调查法是通过调查用户在各种假想停电方式下的停电损失来衡量停电损失的大小。

由于本文的经济性需求主要指创造 GDP 的部分，所以采用间接分析法来计算用户直接停电损失，即以单位用电量的经济产值来衡量用户单位的经济性需求的大小。经济性级别用式(2)表示。

$$L = \min \{P / (MC_0), 3\} \quad (2)$$

式中： P 为用户月产值； M 为用户月耗电量； C_0 为所有用户平均月单位电量产值。

3) 优质性需求

优质性需求指停电造成用户无法进行正常的作息生活时对电力应急的需求。一方面，停电导致照明的消失、空调不能工作、电子产品无法使用等，用户的生活受到影响，员工的良好的工作环境遭到破坏；另一方面，由于缺电，电能质量达不到用户需求标准导致灯泡闪烁、电饭煲等难以正常工作从而影响用户的生活质量。在发生重大电力事故时，我们可以想象机关单位的优质性需求相比居民用户的优质性需求要高。为此，用 E 表示用户的优质性

级别, 用户的优质性级别由其单位综合性质决定。

2 基于用户需求的应急电力资源优化配置模型

2.1 问题描述

当城市发生大面积电力故障时, 电力用户自身会启动其备用电源, 电网侧会启动冗余或者备用线路来尽力恢复电力用户供电, 这些操作都是秒级的, 能够在极短的时间内恢复一些停电负荷, 往往当城市发生大型停电事故时, 以上这些操作无法恢复所有电力用户供电, 仅仅能够恢复小部分电力用户。此时, 电力公司将调动移动应急电源来保护更多的用户供电, 维护城市安全。

假设某供电公司共有 l 种不同容量移动应急发电车, 有 n 个失电用户分区。从安全性、经济性、优质性 3 个方面对失电用户分区 j 的负荷进行分类, 分别为负荷 1、负荷 2 和负荷 3, 功率分别为 d_{j1} , d_{j2} , d_{j3} , 负荷 d_{j1} 对应用户分区 j 安全性需求的负荷功率, 负荷 d_{j2} 对应用户分区 j 经济性需求的负荷功率, 负荷 d_{j3} 对应用户分区 j 优质性需求的负荷功率。 p_{j1}, p_{j2}, p_{j3} 分别为供电公司为失电用户 j 提供的恢复负荷 1、负荷 2 和负荷 3 的功率。

2.2 目标函数

用户安全性满意度 x_1 为

$$x_1 = \frac{\sum_{j=1}^n M_j p_{j1}}{\sum_{j=1}^n M_j d_{j1}} \quad (3)$$

式中, M_j 为用户 j 的安全性级别。

用户经济性满意度 x_2 为

$$x_2 = \frac{\sum_{j=1}^n L_j p_{j2}}{\sum_{j=1}^n L_j d_{j2}} \quad (4)$$

式中, L_j 为用户 j 的经济性级别。

用户优质性满意度 x_3 为

$$x_3 = \frac{\sum_{j=1}^n E_j p_{j3}}{\sum_{j=1}^n E_j d_{j3}} \quad (5)$$

式中, E_j 为用户 j 的优质性级别。

那么利用移动应急电源达到的所有用户的需求满意度为

$$X = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \omega_3 x_3 \quad (6)$$

式中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别是为安全性、经济性、优质性需求设置的权重系数, $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$, 应急电力资源的调度目标函数为使所有用户的需求满意度 X 最大化, 即

$$\max X = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \omega_3 x_3 \quad (7)$$

2.3 约束条件

第 $k(k=1, 2, \dots, l)$ 种类型的移动应急电源的容量为 P_k , 供电公司给用户 j 提供的第 k 种移动应急电源的个数为 y_{jk} 。

1) 容量约束

$$p_{j1} + p_{j2} + p_{j3} \leq \sum_{k=1}^l y_{jk} P_k \quad (8)$$

$$p_{j1} \leq d_{j1} \quad (9)$$

$$p_{j2} \leq d_{j2} \quad (10)$$

$$p_{j3} \leq d_{j3} \quad (11)$$

2) 移动应急发电车个数限制

$$\sum_{j=1}^n y_{jk} \leq z_k, \quad k=1, 2, \dots, l \quad (12)$$

式中, z_k 为第 k 种移动应急电源的个数。

3) 变量约束

y_{jk} 和 z_k 为整数且大于等于 0。

3 案例分析

根据某电力公司的供电范围将其供电区域划分为 10 个分区, 每个分区算作本文模型所述的一个用户, 根据浦东局的以往数据统计, 利用本文的需求指标计算方法得到 10 个用户的安全性级别、经济性级别和优质性级别见表 1。

假设遭遇大面积停电, 各用户的待恢复负荷功率见表 2。

浦东电力局的移动应急电源配置情况见表 3。

表 1 用户的需求级别表

Table 1 User demand level

用户	安全性级别	经济性级别	优质性级别
1	0	0.8	2
2	0	2.1	1
3	1.5	0	1
4	0	3.0	3.5
5	0	0.7	1
6	5	0.6	1.3
7	0	3.0	1
8	0	0	1.5
9	3	2.0	1
10	0	1.8	5

表 2 用户负荷待恢复功率表
Table 2 User load power to be restored

用户	负荷 1/kW	负荷 2/kW	负荷 3/kW
1	0	160	20
2	0	200	80
3	200	0	30
4	0	150	60
5	0	250	50
6	250	155	200
7	0	280	40
8	0	0	210
9	160	200	50
10	0	80	70
总计	610	1475	810

表 3 移动应急电源型号与数目表

Table 3 Type and number of mobile emergency power

型号	数目	容量/kW
1	2	400
2	2	250
3	2	160
4	5	50

给定 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 的值分别为 0.55, 0.3, 0.15, 经过对本文线性整数规划优化模型求解得到移动应急电源的分配方案, 见表 4。

表 4 移动应急电源分配方案

Table 4 Mobile emergency power allocation scheme

用户	供给电源
2	一台型号 2
3	一台型号 3 和一台型号 4
4	一台型号 3 和一台型号 4
6	一台型号 1
7	一台型号 2 和一台型号 4
9	一台型号 1
10	两台型号 4

各用户的供给负荷分配见表 5。

表 5 用户负荷供给功率表

Table 5 Users' power supply

用户	负荷 1/kW	负荷 2/kW	负荷 3/kW
1	0	0	0
2	0	200	50
3	200	0	10
4	0	150	60
5	0	0	0
6	250	0	150
7	0	280	20
8	0	0	0
9	160	200	40
10	0	30	70
总计	610	860	400

用户安全性满意度 x_1 为 1, 用户经济性满意度 x_2 为 0.8166, 用户优质性满意度 x_3 为 0.66, 用户需求满意度 X 为 0.894。用户各指标需求满意度如图 1 所示。

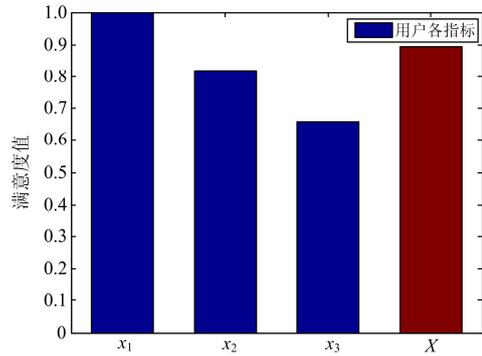


图 1 用户各指标需求满意度

Fig. 1 Users' demand satisfaction indicators

4 结论

本文提出的电网应急状态下的用户需求指标及其衡量方法有其科学性和现实指导意义, 为基于用户需求的移动应急电源优化配置提供安全性、经济性和优质性需求等级的量化方法。最终通过实际算例实现, 验证了移动应急电源优化配置模型的实际可行性。需要说明的是, 本文的用户既可以指单个具体用户, 也可以指一个大型分区用户, 例如一个片区。发生大面积电力事故时, 电力公司向所管辖区域内各片区依据不同用户需求优化调配移动应急发电车。

参考文献

[1] 高志远, 姚建国, 郭昆亚, 等. 智能电网对智慧城市的支撑作用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 148-153.
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, GUO Kunya, et al. Study on the supporting role of smart grid to the construction of smart city[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 148-153.

[2] 刘永坤, 李成. 我国能源效率及其影响因素分析[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 1-7.
LIU Yongkun, LI Cheng. China's energy efficiency and its influence factors[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(3): 1-7.

[3] 国家电网公司. 国家电网公司处置电网大面积停电事件应急预案[Z]. 2005.
State Grid Corporation of China. State grid corporation of grid blackouts disposal of emergency response plan[Z].

- 2005.
- [4] 王远东. 内蒙古东部电网应急管理体系完善研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
WANG Yuandong. Research on construction of the power grid emergency management system of the eastern part of inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [5] 王涛, 张尚, 顾雪平, 等. 电力系统运行状态的趋势辨识[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 171-180.
WANG Tao, ZHANG Shang, GU Xueping, et al. Trends identification of power system operating states[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 171-180.
- [6] 尚敬福. 大面积停电应急关键理论及技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
SHANG Jingfu. Research on key theory and technology of emergency response for large-scale blackouts[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [7] 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 siting of power emergency multi-point service provisions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 40-45.
- [8] 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, 84.
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, 84.
- [9] 张铃珠, 吕林, 魏震波, 等. 基于V2G的EPS功能的应急电源优化分配[J]. 华东电力, 2014, 42(1): 132-136.
ZHANG Lingzhu, LÜ Lin, WEI Zhenbo, et al. Optimal assignment of emergency power supply based on EPS functions of V2G[J]. East China Electric Power, 2014, 42(1): 132-136.
- [10] 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.
- [11] 周莉梅. 城市电网应急电源的优化配置与恢复供电方案[J]. 供用电, 2014(4): 33-37.
ZHOU Limei. Optimize the urban grid configuration and restore emergency power supply scheme[J]. Distribution & Utilization, 2014(4): 33-37.
- [12] 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 partitioning and optimal connecting point search of mobile emergency power source based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 34-40.
- [13] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.
CAI Dehua, CHEN Baixi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [14] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26.
ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.
- [15] 鲍彦, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.
BAO Yan, JIA Limin, JIANG Jiuchun, et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126.

收稿日期: 2016-03-20

作者简介:

杨舒婷(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网仿真研究; E-mail: 1430143791@qq.com

谢宁(1974-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统规划运行与可靠性研究等。E-mail: xiening@sjtu.edu.cn

(编辑 魏小丽)