

DOI: 10.7500/AEPS20131101007

电力系统应急服务多点最优选址规划

梁博森¹, 王 宏², 林振智¹, 文福拴¹, 杨 滢³, 陈文进³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 南方电网科学研究院, 广东省广州市 510080;
3. 国网浙江省电力公司, 浙江省杭州市 310007)

摘要:合理规划电力系统应急服务点对于保证应急资源及时运送,进而降低停电损失具有重要意义。现有电力系统应急方面的研究多侧重于应急平台建设和相关指标体系构建,而对应急服务点选址优化问题则研究较少。在此背景下,通过综合考虑用户停电损失、停电时限约束及应急服务点的服务成本,建立了以电力应急总成本最小为优化目标的应急服务多点选址的优化模型,并采用 Floyd 算法求解该优化模型。最后,用算例说明了所构建模型的正确性与所采用算法的有效性。

关键词: 应急服务; 多点选址; 优化模型; 停电损失; Floyd 算法; 电力系统

0 引言

国内外近年来发生的多起大面积停电事故引发了人们对电力系统应急服务的更多关注。文献[1-4]指出,由于电力系统结构复杂、覆盖面积大、无法排除外界影响,完全杜绝大面积停电事故在技术和经济方面都不现实。这样,建设高效、可靠的电力系统应急管理平台就显得尤为重要。国内外在电力系统应急服务方面已经做了一些研究工作。文献[5-6]提出了电力系统应急管理平台的概念和总体框架,并在此基础上设计了信息系统结构,探讨了相关技术对策;文献[7]提出了电力系统应急体系中灾害损失预评估方法;文献[8-9]分别从城市电力系统停电风险及系统论的视角,研究了应急能力评估的技术指标,建立了大面积停电应急评价指标体系,并采用模糊层次分析法进行多指标综合量化分析;文献[10]提出了一种针对城市配电系统的应急预警方法,即采用设备停运概率分析各种突发事件下的配电系统停电风险,进而判定突发事件的预警级别;文献[11]建立了电力系统应急电源优化配置模型,并采用遗传算法求解;文献[12]在综合考虑负荷重要程度和故障概率的基础上对负荷点的重要性进行了评估,提出了以到各应急点总加权时间最小为目标

的储备库选址方法,得到电力应急储备库的最佳位置。

综上所述,现有电力系统应急方面的研究工作多侧重于应急指标体系建立和应急平台框架设计等方面,而在应急资源的储备和配置、应急服务点的规划与选址等方面的研究则不多。然而,电力系统应急服务的有序开展有赖于详细而周密的规划,对应急服务做针对性的合理配置不仅有利于充分利用现有应急资源,还有助于明显减少社会损失。在上述背景下,本文针对电力系统应急服务点的多点选址规划问题开展了较为深入系统的研究。

1 计及停电损失的应急服务多点选址规划模型

在对电力应急服务点优化选址时,以应急服务时间最短作为优化目标一般是不合适的,因为如此得到的优化方案的社会总损失未必最小,尽管在给定时间内把应急资源送到失电的重要用户是必须考虑的重要因素。因此,应在满足电力系统应急总体时间要求的约束下,以各重要用户的总停电损失之和最小作为应急服务点选址规划目标。

负荷点的停电损失主要由其负荷类型、缺电功率、停电时间所决定。不同类型负荷的单位功率单位时间内的停电损失一般也不同。重要负荷一般都会根据自身需求情况,按照相关规定自备一定数量的应急电源,因此,实际负荷点的缺电功率为该点的负荷点功率与自备应急电源容量之差。设负荷点 i 的负荷功率为 P_i ,自备应急电源容量为 P_i' ,单位时间单位功率的停电损失为 C_{ij} ,则其单位时间内的停

收稿日期: 2013-11-01; 修回日期: 2014-05-07。

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA05A105);国家自然科学基金资助项目(51007080, 51377005);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012QNA4011);国网浙江省电力公司科技项目(5211011306TB)。

电损失为:

$$S_i = C_{ij}(P_i - P_i') \quad (1)$$

对于负荷点 i , 其每年的停电频次期望值 a_i 可以基于设备停运概率和网络拓扑结构通过系统节点可靠性分析获得, 或者直接由相关电力公司的统计数据整理得到。每个负荷点的年停电频次和每次停电的单位时间损失值共同决定该负荷点每年的停电损失, 其可在相当程度上反映该负荷点在应急服务过程中的重要性程度(简称“重要度”); 换言之, 可用 $a_i S_i$ 表示负荷点 i 的重要度。

给定无向的电力应急网络 $G = \{V, E\}$ 。其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为 G 的点集, 表示所研究区域的 n 个负荷点; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 为连接 G 中各点的边集, 模拟区域中各负荷点间的物理路径(交通路径)。定义负荷点 i 的重要度 $a_i S_i$ 即为顶点 v_i 的权重。连接顶点 v_q 和 v_t 的边 e_j 的弧长 $b(e_j)$ 可表示为 $b(v_q, v_t)$, 即 $b(e_j) = b(v_q, v_t)$ 。用 $l(x, y)$ 表示连接 G 中任意两点 x 和 y 之间的电力资源最短运送时间; 用符号 $x \in (v_q, v_t)$ 表示 x 处于顶点 v_q 和 v_t 之间。这样, 对于 $x \in (v_q, v_t)$, $l(v_i, x)$ 具有如下性质:

$$l(v_i, x) = \min\{l(v_i, v_q) + l(v_q, x), l(v_i, v_t) + l(v_t, x)\} \quad (2)$$

对于规模较大、结构复杂、时限要求严格的电力系统应急网络, 单个应急服务点往往难以满足实际应急需求; 为保障电力系统应急需求, 需要配置多个应急服务点才能协同完成突发情况下的应急任务。对于电力系统应急服务而言, 时限约束是极其重要的, 其为应急点选址规划所必须考虑的硬约束; 这里设电力应急资源运输时间所允许的最长应急时限为 t_l 。设 $X_p = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ 为 G 中一组候选应急服务点集, 共有 p 个。设应急服务点个数的上限为 p_{\max} , 其可根据所研究地域大小、经济发展程度、区域重要性等因素确定。此外, 需要构建统一的应急服务平台, 统筹区域中各个重要用户的应急需求, 对区域内的电力应急服务点进行协同调度, 以降低总的停电损失。可以将电力应急服务点的建设费用折算至其使用寿命中的每一年, 并与当年该应急服务点运行维护费用相加, 得到该年提供应急服务的成本。设第 j 个应急服务点的年服务成本为 A_j , 电力应急平台的年服务成本为 A_0 , 并假定所研究区域年应急服务投入预算上限为 B 。综合考虑应急服务成本和用户停电损失, 定义每年应急服务成本和各负荷点的总停电损失之和为电力系统应急总成本。为生成特定区域内电力系统应急服务点的多点最优选

址方案, 下文以电力系统应急总成本最小为目标, 建立应急多点选址规划模型。

为便于论述, 基于文献[13]中所给出的应急网络的一般定义, 先给出电力系统应急网络的如下定义^[13]。

定义 1 电力系统应急网络 G 中的一个顶点 v 到点集 X_p 的距离为 $l(v, X_p) = \min_{1 \leq i \leq p} l(v, x_i)$ 。

定义 2 如果电力系统应急网络 G 中的点集 X_p^* 对于 G 上的任何点集 X_p , 都存在 $\max_{v \in V} l(v, X_p) \geq \max_{v \in V} l(v, X_p^*)$, 则称 X_p^* 为网络 G 的 p -绝对中心点。

定义 3 当 X_p^* 为网络 G 的 p -绝对中心点时, 称 $r_p(G) = \max_{v \in V} l(v, X_p^*)$ 为网络 G 的 p -绝对半径。

在上述背景下, 计及负荷停电损失的电力系统应急服务点的多点选址优化问题可描述为:

$$\min F(X_p) = \sum_{i=1}^n a_i S_i l(v_i, X_p) + \sum_{j=1}^p A_j + A_0 \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, X_p) &\leq t_l \\ \sum_{j=1}^p A_j + A_0 &\leq B \\ X_p &\in G \end{aligned}$$

该模型综合考虑了电力系统应急的服务成本和各重要用户的停电损失, 并考虑了应急服务时限和成本约束。

2 多点选址优化模型的求解

在求解式(3)所描述的优化模型之前, 首先需要确定满足约束 $\max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, X_p) \leq t_l$ 的点集 X_p 的取值范围。对于顶点数为 n 的电力系统应急网络图 G , 可以采用 Floyd 算法^[14] 确定最小距离矩阵 \mathbf{S} 和最短路径矩阵 \mathbf{W} 。 \mathbf{S} 中的每个元素 $s_{ij} = l(v_i, v_j)$ 表示顶点 v_i 到 v_j 的最短距离, 其中 $s_{ii} = 0$, 且 \mathbf{S} 为对称阵; \mathbf{W} 中的每个元素 w_{ij} 表示顶点 v_i 到 v_j 的最短路径中首次经过的点, 由 \mathbf{W} 可得任意两顶点间的最短路径。 \mathbf{S} 的第 j 行表示顶点 v_j 到 G 中各顶点的最短距离。

在顶点 v_j 及其通向其他顶点的连线上可以找到 p 个点并记为点集 X_p^j , 使 X_p^j 到距离最远的顶点的最大距离最小, 则称 X_p^j 为这 p 个点的局部中心点, 此最大距离即为该局部中心点的局部半径 $r(X_p^j)$ 。若对任意 $j \in (1, n)$, 均有 $r(X_p^j) > t_l$, 则时限要求无法满足, 图 G 中不存在满足时限要求的

选址点;在此情形下,没有可行解,可以只考虑使 $\max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, X_p) - t_l$ 尽可能小,最后得到图 G 的绝对中心点,也即 n 个局部中心点 X_p^j 中局部半径最小的点,且该点到最远的重要负荷点的距离就等于该局部半径。

为便于分析待求解的优化模型和确定局部半径 $r(X_p^j)$,下面给出两个引理^[13]。

引理 1 若 X_p^j 是 G 的局部中心点,则 $r(X_p^j)$ 是从 X_p^j 中某个点到 G 的至少两个直接相连的点的距离。

引理 2 从最小距离矩阵 S 的第 j 行找出最大元素 $l(v_j, v_{d_1})$,然后再找出不在路径 $l(v_j, v_{d_1})$ 上的次最大元素 $l(v_j, v_{d_2})$,以此类推并找出第 $p+1$ 个最大元素 $l(v_j, v_{d_{p+1}})$,则局部中心点分布为: x_1^j 在 v_j 到 v_{d_1} 的最短路径上, x_2^j 在 v_j 到 v_{d_2} 的最短路径上, \dots , x_p^j 在 v_j 到 v_{d_p} 的最短路径上,且各点局部半径的计算公式为:

$$\begin{cases} r(x_1^j) = \frac{l(v_j, v_{d_1}) + l(v_j, v_{d_{p+1}})}{2} \\ r(x_2^j) = \frac{l(v_j, v_{d_2}) + l(v_j, v_{d_{p+1}})}{2} \\ \vdots \\ r(x_p^j) = \frac{l(v_j, v_{d_p}) + l(v_j, v_{d_{p+1}})}{2} \end{cases} \quad (4)$$

该点集 x_p^j 的局部半径为:

$$r(x_p^j) = \frac{l(v_j, v_{d_1}) + l(v_j, v_{d_{p+1}})}{2} \quad (5)$$

由引理 2 可得 G 中所有符合约束条件 $\max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, X_p) \leq t_l, j \in (1, n)$ 的点。若 $r(x_p^j) > t_l$,则在 v_j 所处的局部找不到可行解满足 $\max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, X_p^j) \leq t_l$ 。若 $r(x_p^j) \leq t_l$,可从引理 2 中确定的局部中心点 $x_1^j, x_2^j, \dots, x_p^j$ 分别沿方向 $w(x_1^j, v_{d_1})$ 和 $w(x_1^j, v_{d_{p+1}}), w(x_2^j, v_{d_2})$ 和 $w(x_2^j, v_{d_{p+1}}), \dots, w(x_p^j, v_{d_p})$ 和 $w(x_p^j, v_{d_{p+1}})$ 移动 $t_l - r(x_1^j), t_l - r(x_2^j), \dots, t_l - r(x_p^j)$ 个距离单位,标记它们为时限边界点,分别记为 $v_1^{j'}$ 和 $v_1^{j''}, v_2^{j'}$ 和 $v_2^{j''}, \dots, v_p^{j'}$ 和 $v_p^{j''}$,则对于任意 $x_p^j \in (v_1^{j'}, v_1^{j''}), \max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, X_p^j) \leq t_l$ 。当存在满足时限要求的电力系统应急服务点,即存在 $j \in (1, n)$ 使得 $r(X_p^j) \leq t_l$ 成立,则可从满足时限要求的点中选择最优应急选址点。

一般而言,图 G 中每个候选应急服务点的年服务成本(即年度建设成本与年运行成本之和)都不尽相同。为不失一般性,设第 j 个应急服务点的年服

务成本 A_j 为其所在路径上的相对位置的分段函数,如图 1 所示。

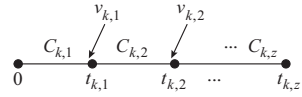


图 1 某路径上各区间的应急服务点的年服务成本分布
Fig.1 Annual service cost of emergency service for each interval in one path

这样,对于路径 $e_k (k=1, 2, \dots, m)$,设其被该路径上 $z-1$ 个服务成本分界点 $v_{k,1}, v_{k,2}, \dots, v_{k,z-1}$ 分为 z 段,各段上一年度的服务成本依次为 $C_{k,1}, C_{k,2}, \dots, C_{k,z}$,则在该路径上选择某点建设电力应急服务点的年服务成本为:

$$C_k = \begin{cases} C_{k,1} & 0 < t \leq t_{k,1} \\ C_{k,2} & t_{k,1} < t \leq t_{k,2} \\ \vdots & \vdots \\ C_{k,z} & t_{k,z-1} < t \leq t_{k,z} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $0 < t_{k,1} < t_{k,2} < \dots < t_{k,z}, t_{k,1}, t_{k,2}, \dots, t_{k,z-1}$ 依次表征各服务成本分界点 $v_{k,1}, v_{k,2}, \dots, v_{k,z-1}$ 在该路径上的位置; $t_{k,z}$ 为路径 e_k 的总运输时间。这样,对于 $X_p^j \in e_k, A_j = C_k$ 。如果在某路径上各候选地点的年服务成本相同,则该路径年服务成本函数可视为只有一段。对于被选中建设应急点的任一服务成本分界点 $v_{k,x}$,假设该选址点的实际位置为 λ 。对于由年服务成本分界点确定的选址点 λ ,根据经济性可知,其将选址于较为经济的一侧。即对于 $v_{k,x}$,如果其左侧为 $C_{k,x}$,右侧为 $C_{k,x+1}$;若 $C_{k,x} > C_{k,x+1}$,则应急点实际选址应为 $\lambda + \sigma, \sigma$ 为一个极小的量,否则应急点的实际选址应为 λ 。

为在满足时限要求的候选点中确定最优方案,针对式(3)所描述的图论优化问题展开探讨,以简化问题并改善求解效率。可以证得(证明过程详见附件 A),当满足时限要求时,式(3)所描述的优化模型的最优解一定包含在以下几个候选点之中:①时限边界点;②连接每对时限边界点连线上的原有顶点(即负荷点)和年服务成本分界点。

这样,求解式(3)所描述的优化模型就可以转化为在数目有限的候选点处寻优的问题。遍历所有负荷点,寻找所有满足条件的局部最优解,并逐一计算各个局部最优解相应的应急总成本,其中最小者所对应的方案即为应急服务多点选址的全局最优方案。

基于上述分析,可以得到电力系统应急多点优化选址问题的求解步骤如下。

步骤 1:应用 Floyd 算法^[14] 确定应急网络图 G

的最小距离矩阵 \mathbf{S} 和最短路径矩阵 \mathbf{W} 。

步骤 2: 令 $p=1, j=1$, 局部中心点存在标识符 $n_{\text{loop}}=0$, 最优解 $p^*=0, F(p^*)=100$ 万元。

步骤 3: 从 \mathbf{S} 的第 j 行中找出最大的元素 $l(v_j, v_{d_1})$, 然后再找出不在于路径 $l(v_j, v_{d_1})$ 上的次最大元素 $l(v_j, v_{d_2})$, 以此类推找出第 $p+1$ 个最大的元素 $l(v_j, v_{d_{p+1}})$, 并由式(5)求出各点的局部半径。

步骤 4: 比较由式(5)确定的局部半径 $r(X_p^j)$ 和事先给定的电力系统应急最长允许时限 t_l 。若 $r(X_p^j) > t_l$, 则转步骤 6; 否则, 置 $n_{\text{loop}} = n_{\text{loop}} + 1$, 转步骤 5。

步骤 5: 从局部中心点 $x_1^j, x_2^j, \dots, x_p^j$ 分别沿方向 $w(x_1^j, v_{d_1})$ 和 $w(x_1^j, v_{d_{p+1}})$, $w(x_2^j, v_{d_2})$ 和 $w(x_2^j, v_{d_{p+1}})$, $\dots, w(x_p^j, v_{d_p})$ 和 $w(x_p^j, v_{d_{p+1}})$ 移动 $t_l - r(x_1^j), t_l - r(x_2^j), \dots, t_l - r(x_p^j)$ 个距离单位, 标记它们为时限边界点, 并分别记为 $v_j^{1'}$ 和 $v_j^{1''}, v_j^{2'}$ 和 $v_j^{2''}, \dots, v_j^{p'}$ 和 $v_j^{p''}$ 。

步骤 6: 置 $j=j+1$, 若 $j \leq n$, 则转步骤 3; 否则, 转步骤 7。

步骤 7: 从上述时限边界点和它们连线上的原有顶点、年服务成本分界点(记为 h 个)中任意选取 p 个顶点组成 X_p^j (共有 d 种组合, 其中 $d=C_h^p$), 分别计算各个候选点集相应的应急总成本, 即 $F(X_{p_1}^j), F(X_{p_2}^j), \dots, F(X_{p_d}^j)$ 。

步骤 8: 若 $n_{\text{loop}}=0$, 取局部半径最小的局部中心点 X_p^j 作为最优应急选址点; 若 $n_{\text{loop}} \neq 0$, 则取步骤 7 中求得的各组由时限边界点、连线间原有顶点或年服务成本分界点所构成的 X_p^j 。在满足 $\sum_{j=1}^p A_j + A_0 \leq B$ 的可行解中, 找出最优解 X_p^j , 使应急服务总成本 $F(p)$ 最小。

步骤 9: 比较 $F(p)$ 与 $F(p^*)$, 若 $F(p) < F(p^*)$, 令 $F(p^*) = F(p), p^* = p$ 。若 $p < p_{\text{max}}$ (取各路径年成本函数各分段取值中的最小值, 设为 C_{min} , 则 $p_{\text{max}} = B/C_{\text{min}}$), 则令 $p = p + 1$, 返回步骤 3; 否则, p^* 即为最优应急服务点数目, 即为相应的最优选址方案。

综上, 电力系统应急多点优化选址的基本计算流程见附录 B 图 B1。

3 算例分析

下面以某区域电力系统多个应急服务点的最优选址为例, 来说明所发展的模型与方法的基本特征。设所研究区域中有 13 个重要负荷点, 这些负荷点的负荷容量、应急电源配置情况、单位停电损失及年停

电频次期望值见附录 C 表 C1。除非特别说明, 下面所说的负荷点均指重要负荷点。将负荷点抽象为节点, 基于地理信息系统(GIS)等手段所获得的外部信息可估算出各条路径的电力资源运送时间, 并将其标记在各条弧上, 由此可建立如附录 C 图 C1 所示的电力应急网络图。假设每个应急服务点的年服务成本见附录 C 表 C2, 应急平台的年服务成本为 10 万元^[15]。给定应急资源从应急服务点到各负荷点的运送时间不得超过 14.5 min, 应急服务年度总投入上限 B 为 125 万元。

首先基于附录 C 表 C1 所给出的负荷点数据, 确定每个负荷点的单位时间停电损失和年停电频次期望值, 其结果见附录 C 表 C3。每个负荷点单位时间内的停电损失可由这两个参数确定。由前述可知, 每个负荷点单位时间内的停电损失即为其在电力应急网络中的权重。

之后, 应用 Floyd 算法确定应急网络图 G 的最小距离矩阵 \mathbf{S} 和最短路径矩阵 \mathbf{W} , 并分别求取在建设不同数目的应急服务点情况下的局部中心点集。通过计算可得, $p_{\text{max}}=7$, 即 p 取 1~7。针对建设不同数目应急服务点的情况, 分别对选址进行优化, 则得到电力应急的局部半径如附录 C 表 C4 所示。对于任意负荷点所在的局部区域, 随着 p 值的增加, 可能找不到不在已选路径上的负荷点, 此时根据引理 2 可知, 继续增加应急服务点的个数不能使应急服务点的服务半径缩短, 故在附录 C 表 C4 中用“—”表示这种情况; 换言之, 对于该负荷点而言, 在这种情况下再增加应急服务点是多余的。

在不同数目的应急服务点情况下, 对于每一个重要负荷点所处的局部区域, 根据局部半径与应急时限差异可生成多种方案。如果局部半径大于应急时限, 则该局部备选方案均无法满足时限要求, 此时惩罚因子取很大的数字如 1 000 000, 使目标函数也即电力应急总成本激增, 在这种情况下所形成的选址方案的总应急成本 F 自然就很大。当局部半径不大于应急时限, 点集 X_p 中的每个点都可能有多重选择, 即局部半径等于时限、局部半径小于时限但活动区域内不包含原有负荷点、局部半径小于时限且包含原有负荷点或者成本分界点。在不同的情况下, 每个应急服务点也有不同的选择, 对不同选择逐一组合即可形成多组备选方案。对每一个 p 值下的每一种方案进行遍历, 取总应急成本最小者为该 p 值下的最优选址方案。表 1 给出了在不同应急服务点数目下的最优选址方案和相应的总应急成本。

在表 1 中,“—”表示存在冗余方案,即对于相关应急服务区域,其应急服务投入已经过剩。现在考察在不同应急服务点数目下的最优选址方案,对于每个局部备选区域,如果其中包含原有负荷点,则将应急服务点选在原有负荷点上时可以使整个区域的停电损失最小。由各个负荷点的信息可知,对于权重较大的点所在的局部区域,应急服务点选在该负荷点上更有利于降低总停电损失。根据表 1 可绘制如附录 C 图 C2 所示的电力应急服务点数 p 与电力应急服务总成本 F 之间的关系图。在给定不同数目的电力应急服务点的情况下,电力应急服务点的最优选址方案相应的最优选址点位置见附录 C 图 C3。

表 1 在不同应急服务点数目下的最优选址方案和相应的总应急成本

Table 1 Best schemes and their corresponding total costs under different number of emergency service points

| 应急服务点数目 p | 最优解 X_p^* | 最优应急总成本 F /万元 |
|-------------|--------------------------------------|-----------------|
| 1 | V_6 | 81.31 |
| 2 | V_4, V_{11} | 72.40 |
| 3 | V_1, V_4, V_{11} | 78.61 |
| 4 | $V_4, V_{10}, V_{11}, V_{13}$ | 94.73 |
| 5 | $X_3^1, V_3, V_{10}, V_{11}, V_{13}$ | 106.93 |
| 6 | — | 121.93 |
| 7 | — | 136.93 |

从附录 C 图 C2 可以看出,所研究区域建设电力应急服务点的最优数目为 $p=2$,即分别建于点 V_4 和 V_{11} ;该最优方案的电力应急服务总成本为 $F=72.40$ 万元。

4 结语

本文对电力应急服务多点最优选址问题进行了较为系统的研究,在考虑了用户的停电损失和停电时限约束、电力应急服务成本等因素的基础上,建立了以应急服务总成本最小为目标确定应急服务点数目和选址的优化模型。通过研究该模型的数学特性,提出了简化的处理方法,并利用 Floyd 算法来求解这一优化问题。最后,用算例对所提出的模型与方法做了说明。本文的主要工作在于将基于 Floyd 算法的 p -中心选址法应用于尚处于初步发展阶段的电力系统应急领域,在满足重要用户停电时限的同时,量化了重要用户的停电损失,以期获得全局最优(即损失最小、危害最小)的解。

需要指出,本文只是对电力应急服务多点选址问题做了一些探索,这方面仍有很多问题有待研究或进一步研究。例如,如何在电力应急服务多点优

化选址时适当考虑各种不确定性因素,这也是下一步将要研究的问题。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J].电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts; Part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [2] 陈向宜,陈允平,李春艳,等.构建大电网安全防御体系——欧洲大停电事故的分析及思考[J].电力系统自动化,2007,31(1):4-8.
CHEN Xiangyi, CHEN Yunping, LI Chunyan, et al. Constructing wide-area security defensive system in bulk power grid—a pondering over the large-scale blackout in the European power grid on November 4[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 4-8.
- [3] 郭永基.加强电力系统可靠性的研究和应用——北美东部大停电的思考[J].电力系统自动化,2003,27(19):1-5.
GUO Yongji. To focus on improving power system reliability—a pondering over the East North-America major blackout [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 1-5.
- [4] 薛禹胜.综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J].电力系统自动化,2003,27(18):1-5.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern interconnection blackout in 2003 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.
- [5] 田世明,陈希,朱朝阳,等.电力应急管理平台研究[J].电网技术,2008,32(1):26-30.
TIAN Shiming, CHEN Xi, ZHU Chaoyang, et al. Study on electric power emergency management platform [J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 26-30.
- [6] 吴文传,张伯明,曹福成,等.电网应急指挥技术支持系统设计与关键技术[J].电力系统自动化,2008,32(15):1-6.
WU Wenchuan, ZHANG Boming, CAO Fucheng, et al. Electric power networks emergency management support system and its key technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 1-6.
- [7] 程正刚,房鑫炎,俞国勤,等.基于脆弱性的电力应急体系灾害损失预评估[J].电力系统保护与控制,2010,38(16):68-72.
CHENG Zhenggang, FANG Xinyan, YU Guoqin, et al. Vulnerability based disaster loss pre-evaluation of power emergency system [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 68-72.
- [8] 赵炜炜,张建华,尚敬福,等.电网大面积停电应急评价指标体系及其应用[J].电力系统自动化,2008,32(20):27-31.
ZHAO Weiwei, ZHANG Jianhua, SHANG Jingfu, et al. Power system large scale blackout emergency evaluation index system and its application [J]. Automation of Electric Power Systems,

2008, 32(20): 27-31.

- [9] 刘思革,范明天,张祖平,等.城市电网应急能力评估技术指标的研究[J].电网技术,2007,31(22):17-20.
LIU Sige, FAN Mingtian, ZHANG Zuping, et al. A prospective research on technical assessment indices of emergency management capability in urban power network [J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 17-20.
- [10] 李锐,陈颖,梅生伟,等.基于停电风险评估的城市配电网应急预警方法[J].电力系统自动化,2010,34(16):19-23.
LI Rui, CHEN Ying, MEI Shengwei, et al. An early warning method for emergency response based on power failure risk analysis of distribution systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 19-23.
- [11] 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.
- [12] CHENG Xianghui, LIU Junyong. A location method research of electricity emergency material storage[C]// Proceedings of 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), April 16-18, 2011, Xianning, China: 13-16.
- [13] 何建敏,刘春林,曹杰,等.应急管理 with 应急系统——选址、调度与算法[M].北京:科学出版社,2005.

- [14] 程晓荣,刘斌,陆旭,等.F-D算法求解最短路径[J].华北电力大学学报,2003,30(6):75-77.
CHENG Xiaorong, LIU Bin, LU Xu, et al. Shortest path solution based on F-D (Floyd-Dijkstra) algorithm [J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(6): 75-77.
- [15] 方磊,何建敏.综合 AHP 和目标规划方法的应急系统选址规划模型[J].系统工程理论与实践,2003,12(12):116-120.
FANG Lei, HE Jianmin. Combining the analytic hierarchy process and goal programming for location model of emergency systems [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2003, 12(12): 116-120.

梁博森(1989—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力应急与电力系统恢复。E-mail: bomiao.liang@gmail.com
王宏(1989—),男,助理研究员,主要研究方向:电力技术情报与电力应急研究。E-mail: wanghong@csg.cn
林振智(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力应急与电力系统恢复。E-mail: zhenzhi.lin@gmail.com
文福拴(1965—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向: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

(编辑 章黎)

Optimal Siting of Power Emergency Multi-point Service Provisions

LIANG Bomiao¹, WANG Hong², LIN Zhenzhi¹, WEN Fushuan¹, YANG Ying³, CHEN Wenjin³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Reasonable siting of power emergency multi-point service provisions is very demanding for ensuring timely delivery of power emergency service resources, and hence reduces the outage costs of power supply. The existing research work on power emergency service provisions is mainly focused on the establishment of a power emergency service platform and the associate evaluation system. Up to now, the optimal siting of power emergency service provisions has not yet been systematically addressed. Given this background, with the minimization of the overall cost of power emergency service provisions as the objective and the permitted outage durations of all loads as constraints, an optimization model is presented for the optimal multi-point siting problem of power emergency service provisions. The overall cost is composed of the annual construction and service cost of each service point, as well as power supply interruption costs of all important loads. Then, the well-established Floyd algorithm is employed to solve the developed optimization model. Finally, a sample system is served for demonstrating the developed optimization model and solving algorithm.

This work is jointly supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A105), National Natural Science Foundation of China (No. 51007080, No. 51377005), the Fundamental Research Funds for Central Universities (No. 2012QNA4011), and State Grid Zhejiang Electric Power Corporation (No. 5211011306TB).

Key words: emergency service; multi-point siting; optimization model; power supply interruption cost; Floyd algorithm; power systems