

计及负荷停电风险的电力应急服务的最优选址

王 宏¹,林振智¹,文福拴¹,项中明²,谷 炜²,吴华华²

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 浙江省电力公司,浙江 杭州 310007)

摘要: 发展了考虑负荷点停电风险的电力应急服务点的选址模型。由负荷点的缺电功率、负荷类型及停电概率确定其单位时间内的停电风险,在此基础上以各负荷点停电风险之和最小为目标建立电力应急服务点的选址优化模型,并且针对实际中电力应急时限约束可能无法满足的问题,引入超时惩罚因子对模型进行扩充。采用 Floyd 算法求解所发展的优化模型。算例结果表明,所提出的模型通过考虑各负荷点停电风险的差异性,在相当程度上避免了现有模型仅以应急时间最短为目标而可能造成实际停电损失较大的问题。

关键词: 电力应急服务; 最优选址; 停电; 风险; Floyd 算法; 模型; 优化

中图分类号: TM 734

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.012

0 引言

近些年来,国内外发生了多起大面积停电事故,如 2003 年美加“8·14”大停电事故、2003 年瑞典—丹麦“9·23”停电事故、2006 年西欧“11·4”大停电事故、2008 年初我国由于冰灾导致的南方地区大面积停电^[1-3]以及 2012 年印度“7·30”大停电事故,这些停电事故对社会和经济发展都造成了严重影响。电力系统发生大面积停电的风险是客观存在的,其成因及演化机理都非常复杂,目前尚无法从根本上彻底预防及杜绝此类事故发生^[4]。因此,有必要建设高效可靠的电力应急管理平台,从而能正确和快速地处置和应对电力突发事件,全面增强电力系统的应急保障能力。电力应急管理平台一般包含预测预警、辅助决策、调度指挥等子系统,而辅助决策子系统中的一项重要内容就是应急资源的优化调配^[5]。应急资源的优化调配就是根据电力系统运行、管理、地理和外部信息,指导电力应急资源的选址、配置及其最优调度。

到目前为止,在电力系统应急管理方面,国内外已经做了一些研究工作。文献[6]设计了电力应急平台的信息系统结构,并对其中涉及的关键技术做了分析;文献[7]从紧急事件分析、城市电力系统停电风险等方面研究了城市电力系统应急能力评估的技术指标;文献[8]应用系统论的思想,建立了大面

积停电应急评价指标体系,并用模糊层次分析法进行了多指标综合量化分析;文献[9]针对互联电力系统,基于多代理系统思想研究了协调控制策略,提出了互联电力系统应急框架结构;文献[10-11]建立了电力最优抢修路径模型,并分别采用 Dijkstra 算法和改进粒子群算法求解;文献[12]提出了一种城市配电系统应急预警方法,通过分析各种突发事件引发的设备停运概率,计算突发事件下配电系统的停电风险,以此为依据确定突发事件的预警级别;文献[13]建立了电力应急电源的优化配置模型,并用遗传算法求解。从上述文献分析可以看出,在电力系统应急资源的储备和调度方面的研究报道较少,对于电力系统应急资源的种类、数量、储备位置及突发事件下的调度模型并未进行充分研究。在电力应急服务点的选址方面,到目前为止还未见研究报道,但这是实际电力应急管理中必须解决的重要问题。电力应急管理最重要的一项职能就是向停电地点及时提供充足的电力应急资源,而电力应急决策者首先需要面对的就是电力应急服务点的选址问题。合理配置电力应急服务点,不仅能够降低成本,还能保证提供电力应急资源运送的时效性,从而能够保证尽快恢复供电,减少损失。

在上述背景下,本文对电力应急服务点选址优化问题开展了比较系统的研究。首先由负荷点的缺电功率和负荷类型确定单位时间内的停电损失,进而确定停电风险,然后根据地理信息将网络抽象成图,并在考虑时限约束以及各负荷点停电风险的情况下建立了电力应急服务点选址模型;之后,采用 Floyd 算法求解所发展的优化模型;最后,用算例系统对所发展的模型和方法做了说明。

1 负荷点停电风险的确定

风险是指在一定条件下和一定时期内,能够导

收稿日期:2012-10-08;修回日期:2013-09-12

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA-05A105);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);浙江省电力公司重点科技项目

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05-A105),the National Natural Science Foundation of China(51007080,51377005),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2012QNA4011) and the Key Project from Zhejiang Electric Power Corporation

致损失的事件发生的可能性及所造成损失的严重程度^[14]。一般可用灾害发生的概率 U 与严重程度 Y 的乘积来确定其风险 R ：

$$R=UY \quad (1)$$

类似地,可以定义突发事件下电力系统中负荷点停电风险,其等于突发事件下负荷点的停电概率与停电损失价值的乘积。

负荷点的停电损失主要由负荷点的缺电功率、负荷点的停电时间以及负荷类型所决定。对于不同类型的负荷,其单位功率单位时间内的停电损失一般不同。通常根据各类用户的停电特性设计调查表并进行调查,得到各类用户单位停电损失的统计值^[15]。停电时间越长,用户的停电损失一般也越大。

按照《电力安全事故应急处置和调查处理条例》(国务院令 599 号)第 5 条的规定,县级以上地方人民政府有关部门确定的重要电力用户,应当按照国务院电力监管机构的规定配置自备应急电源,并加强安全使用管理。因此,一般较为重要的负荷都会根据自身的需求情况及相关规定,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系统可供功率与自备应急电源容量之差。

设负荷点 i 的系统可供功率为 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电损失价值 Y_i 可由式(2)确定。

$$Y_i=C_{ij}(P_i-P'_i) \quad (2)$$

各个负荷点的停电概率可以根据电力设备停运概率模型及网络拓扑分析获得,或者直接由相关电力公司的统计数据整理得到。网络拓扑分析方法的细节可参看文献[12],在此不再赘述,仅以 U_i 表示负荷点 i 的停电概率。这样,可由式(1)确定各个负荷点单位时间内的停电风险 R_i 。

2 电力应急服务点的选址模型

电力应急资源主要包括移动应急电源(即发电车)、电力抢修物资和电力抢修人员等。在电力应急服务点的选址过程中,首先需要考虑的问题就是在某些地点发生突发事件时,电力应急资源如何才能尽量短的时间内到达各个应急点,使得最后造成的损失最小。如果将各个负荷点看成是网络中的顶点,它们发生事故的风险 R_i 作为顶点的权重,连接它们的道路看成是网络中的弧,弧的长度用电力应急资源的运送时间来衡量,那么整个电力应急系统就可以抽象成一张无向赋权图。

负荷点的停电时间越长,其造成的损失一般也越大,因此在确定电力应急方案时,时间因素就非常重要。不过,单考虑时间因素是不够的,需要综合考虑其他相关因素。在现有的应急系统选址时,往往

局限于把“时间最短”作为整个应急系统选址的优化目标,并未考虑其他影响因素,如此得到的应急方案的实际损失就未必最小。由于电力系统各负荷点的停电风险并不相同,这样在满足时间要求的前提下,应当使电力应急服务点尽量靠近单位时间内停电风险大的负荷点,这样才能保证电力应急资源能够尽快被运送到停电风险大的负荷点,从而最大限度地降低停电损失。基于这样的考虑,这里提出在满足时间紧迫性要求的前提下,以各个负荷点的停电风险之和最小作为整个电力应急系统的优化目标。

给定无向连续的电力应急网络 $G=\{V,E\}$ 。其中, $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ 为 G 的点集(即负荷点集合); $E=\{e_1,e_2,\dots,e_m\}$ 为连接 G 中各点的弧集。定义 R_i 为各个顶点 v_i 的权重,即负荷在单位时间内的停电风险($i=1,2,\dots,n$)。若弧 e_j 连接顶点 v_p 和 v_q , 则弧长 $b(e_j)$ 可表示为 $b(e_j)=b(v_p,v_q)$ 。对于 G 中任意 2 点 x 和 y , 用 $l(x,y)$ 表示连接 x 和 y 之间的最短路径长度(即电力应急资源的运送时间); 用符号 $x \in (v_p,v_q)$ 表示 x 处于顶点 v_p 和 v_q 之间。这样,对于 $x \in (v_p,v_q)$, $l(v_i,x)$ 具有以下性质:

$$l(v_i,x)=\min\{l(v_i,v_p)+l(v_p,x),l(v_i,v_q)+l(v_q,x)\} \quad (3)$$

基于上述分析,考虑负荷停电风险的电力应急服务点的选址问题在数学上可描述为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n R_i l(v_i,x) \\ \text{s.t.} \quad & \max_{1 \leq i \leq n} l(v_i,x) \leq t_l \\ & x \in G \end{aligned} \quad (4)$$

其中, n 为负荷点的个数; R_i 为负荷点 i 在单位时间内的停电风险值; x 表示电力应急服务点的位置; $l(v_i,x)$ 表示电力应急资源从应急服务点 x 到负荷点 v_i 所用的最短时间; t_l 为预先设定的最长应急时限。

虽然时限约束是确定电力应急服务方案时必须考虑的因素,但在实际电力应急服务点选址过程中,考虑到不同城市甚至同一城市的不同区域交通状况差别较大,在某些情况下电力应急服务的时间约束有可能无法满足。针对这一问题,在式(4)的优化模型基础上引入超时惩罚因子对其进行改进。

改进后的电力应急服务点选址模型可描述为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n R_i l(v_i,x) + \sigma \left[\max_{1 \leq i \leq n} l(v_i,x) - t_l \right] \\ \sigma = \begin{cases} 0 & \max_{1 \leq i \leq n} l(v_i,x) \leq t_l \\ 999999 & \max_{1 \leq i \leq n} l(v_i,x) > t_l \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, σ 为当电力应急资源运输时间超过给定的最长应急时限 t_l 时的惩罚因子。当电力应急资源运输时间未超过 t_l 时, σ 取值为 0; 反之, 则给定 σ 为一个较大的数, 在本文后面描述的算例中给定 σ 为

999 999。

为便于对上述模型进行分析,先给出如下 2 个定义^[16]。

定义 1 记

$$z_d(x) = \sum_{i=1}^n R_i l(v_i, x) \quad (6)$$

把使得 $z_d(x)$ 最小的点 x_d 称为 G 的绝对中位点。

定义 2 记

$$z_c(x) = \max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, x) \quad (7)$$

把使得 $z_c(x)$ 最小的点 x_c 称为 G 的绝对中心点。

3 基于 Floyd 算法的电力应急选址优化模型的求解方法

首先考虑如何使得 $z_c(x) = \max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, x)$ 最小化。

对于具有 n 个顶点的电力应急网络图 G , 可以采用 Floyd 算法^[17]确定出最小距离矩阵 S 和最短路径矩阵 W 。该算法的基本思想是将 n 个顶点不断插入到其他点的最短路径中, 并比较最短距离是否发生变化。该算法的基本步骤如下。

a. 置 $k=0$ 。对于所有节点 i 和 $j(i, j=1, 2, \dots, n)$, 令 $w_{ij}^{(1)}=j, s_{ii}^{(1)}=0$ (可认为 $b_{ii}=0$), $s_{ij}^{(1)}=b_{ij}(i \neq j)$ (若 i 和 j 之间没有弧, 可认为 $b_{ij}=+\infty$)。

b. 置 $k=k+1$ 。对所有节点 i 和 $j(i, j=1, 2, \dots, n)$, 若 $s_{ij}^{(k)} \leq s_{ik}^{(k)} + s_{kj}^{(k)}$, 则令 $w_{ij}^{(k+1)}=w_{ij}^{(k)}, s_{ij}^{(k+1)}=s_{ij}^{(k)}$; 否则, 令 $w_{ij}^{(k+1)}=w_{ik}^{(k)}, s_{ij}^{(k+1)}=s_{ik}^{(k)} + s_{kj}^{(k)}$ 。

c. 若 $k=n$, 则算法结束, 否则转步骤 **b**。

最小距离矩阵 S 为对称阵, 其中 $s_{ij}=l(v_i, v_j)$ 表示顶点 v_i 到 v_j 的最短距离; 最短路径矩阵 W 中 w_{ij} 表示顶点 v_i 到 v_j 的最短路径中首次经过的点, 由此矩阵可得出任意两顶点间的最短路径, 且有时两点间最短路径并不唯一。

定义 3 最小距离矩阵 S 中的第 j 行的元素表示顶点 v_j 到 G 中各个顶点的最短距离, 因此可在顶点 v_j 及通向其他顶点的连线中找到一点, 使得该点到离其最远的顶点的最大距离最小。该点就称为局部中心点 x_j , 其值称为该局部中心点的局部半径 $r(x_j)$ 。

为便于分析该模型和确定局部半径 $r(x_j)$, 下面给出 2 个引理^[16], 其具体证明过程可参见文献^[16]。

引理 1 若 x_j 是 G 的局部中心点, 则 $r(x_j)$ 一定是由 x_j 到 G 的至少 2 个方向上点的距离决定的。

引理 2 从最小距离矩阵 S 的第 j 行找出最大元素 s_{jk} , 然后再找出不在路径 $w(v_j, v_k)$ 上 (可由最短路径矩阵 W 辅助判断) 的次最大元素 s_{jl} , 则局部中心点一定在 $w(v_j, v_k)$ 上, 且局部半径的计算公式为:

$$r(x_j) = \frac{s_{jk} + s_{jl}}{2} \quad (8)$$

从引理 2 可以得到 G 中所有符合约束条件 $\max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, x) \leq t_l$ 的点。若 $r(x_j) > t_l$, 则此局部不存在能够满足 $\max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, x) \leq t_l$ 的 x 。若 $r(x_j) \leq t_l$, 则可从局部中心点 x_j 沿方向 $w(x_j, v_k)$ 和 $w(x_j, v_l)$ 分别移动 $t_l - r(x_j)$ 个距离单位, 将它们作为新的顶点, 分别标记为 v_j' 和 v_j'' (若考虑到 $w(v_j, v_k)$ 和 $w(v_j, v_l)$ 的最优路径不唯一, 那么局部中心点也不唯一, 分别标记新的顶点为 $v_j^{[1]'}, v_j^{[1]''}, v_j^{[2]'}, v_j^{[2]''}, \dots$), 则对于任意 $x \in (v_j', v_j'')$, $\max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, x) \leq t_l$ 。令 j 从 1 取到 n , 并分别标记新的顶点为 $v_1', v_1'', v_2', v_2'', \dots, v_n', v_n''$, 就可求出 G 中所有满足约束条件的点。

下面分 2 种情况对考虑负荷停电风险的电力应急服务点的选址优化模型即式(5)的最优解进行讨论。

若对于 $j=1, 2, \dots, n$, 均有 $r(x_j) > t_l$, 则图 G 中不存在满足时限要求的选址点。由于惩罚因子 σ 为一个很大的常数, 因此此时可忽略目标函数第 1 项 $\sum_{i=1}^n R_i l(v_i, x)$ 的影响, 只需使得 $\max_{1 \leq i \leq n} l(v_i, x) - t_l$ 尽可能小, 即最后得到的选址点要满足到最远应急点的时间最短, 因此找出图 G 的绝对中心点即可。不难看出, 绝对中心点 x_c 即为 n 个局部中心点 x_j 中局部半径最小的点, 且该点到最远电力应急点的距离就等于该局部半径。

若存在 j 满足 $r(x_j) \leq t_l$, 则存在满足时限要求的电力应急点, 此时对应的惩罚因子 σ 为 0, 最优电力应急点应该在满足时限要求的点中选择。由于式(5)所描述的优化模型中各负荷点单位时间内的停电风险值 R_i 可看作是各个顶点的权重, 这样可以得到如下定理^[16]。

定理 1 当满足时限要求时, 式(5)所描述的优化模型的最优解一定出现在新标记的顶点或连接新标记的顶点连线上的原有顶点。

定理 1 的证明过程详见文献^[16]。定理 1 的重要性在于证明了满足时限要求时电力应急选址模型式(5)的最优解一定出现在新标记的顶点 $v_1', v_1'', v_2', v_2'', \dots, v_n', v_n''$ 或连接新标记顶点连线间的原有顶点, 从而将式(5)所描述的优化模型的求解转化为在数目有限的顶点处来搜寻最优解的问题。基于上述分析, 可得出电力应急服务点选址优化模型的求解算法。

4 电力应急服务点的选址优化流程

根据上述分析, 并由引理 1、2 及定理 1, 可以得出电力应急服务点选址优化模型的求解算法步骤^[16]如下。由此可得考虑负荷点停电风险的电力应急服

务点的选址优化问题的基本流程如图 1 所示。

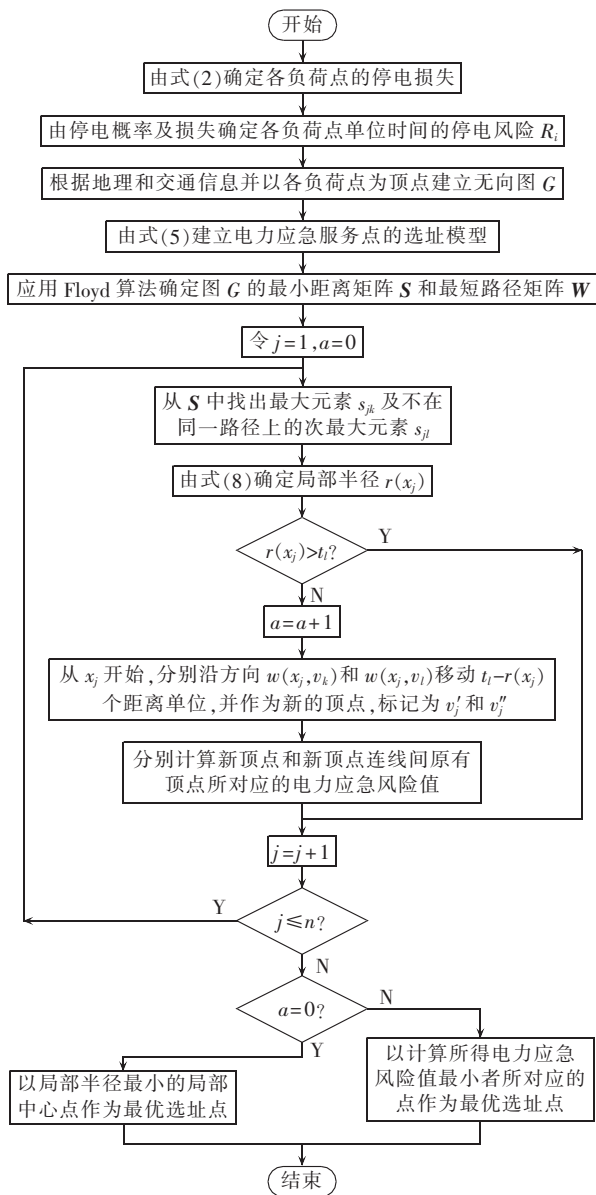


图 1 考虑负荷点停电风险的电力应急服务点选址的优化流程

Fig.1 Flowchart of optimal siting of power emergency service stations considering power outage risk of loads

a. 应用 Floyd 算法确定电力应急网络图 G 的最小距离矩阵 S 和最短路径矩阵 W 。

b. 令 $j=1, a=0$ (a 表示满足时限要求的局部中心点的个数)。

c. 从最小距离矩阵 S 的第 j 行中找出最大元素 s_{jk} , 然后再找出不在路径 $w(v_j, v_k)$ 上 (可由最短路径矩阵 W 辅助判断) 的次最大元素 s_{jl} 。

d. 由式(8)确定局部半径 $r(x_j)$, 并与预先给定的电力应急最长时限 t_l 进行比较。若 $r(x_j) > t_l$, 则转步骤 g; 否则, 令 $a=a+1$, 转步骤 e。

e. 从局部中心点 x_j 开始, 分别沿方向 $w(x_j, v_k)$

和 $w(x_j, v_l)$ 移动 $t_l - r(x_j)$ 个距离单位, 并将此作为新的顶点, 分别标记为 v'_j 和 v''_j 。

f. 分别计算各候选点的电力应急总风险值, 即 $\sum_{i=1}^n R_i l(v_i, v'_j)$ 、 $\sum_{i=1}^n R_i l(v_i, v''_j)$ 、 $\sum_{i=1}^n R_i l(v_i, v_{j_1})$ 、 $\cdots$ 、 $\sum_{i=1}^n R_i l(v_i, v_{j_m})$, 其中 $v_{j_1}, \cdots, v_{j_m}$ 表示在新标记顶点 v'_j 和 v''_j 连线间的原有顶点。

g. 置 $j=j+1$, 若 $j \leq n$, 转步骤 c; 否则, 转步骤 h。

h. 若 $a=0$, 取局部半径最小的局部中心点作为最优选址点; 若 $a \neq 0$, 则取步骤 f 中求得的电力应急风险最小值所对应的新标记顶点或连线间原有顶点为该模型的最优解。

5 算例分析

下面以某区域电力应急服务点的选址为例来说明所发展的模型与方法。该区域有 13 个重要负荷点, 各个负荷点的负荷容量、应急电源配置情况及单位停电损失如表 1 所示。将负荷点抽象为节点, 由 GIS (Geographic Information System) 结合外部信息 (如 Google 地图和百度地图等) 估算出各条路径的电力资源运送时间 (单位为 min), 并将其标记在各条弧上, 由此可建立图 2 所示的电力应急网络图。假设各个负荷点的停电概率均为 0.001, 并给定电力应急

表 1 各负荷点数据

Tab.1 Data of different loads

负荷点 编号	负荷属性	负荷容 量/MW	自备电源 容量/MW	单位停电损失/ [元·(kW·min) ⁻¹]
v_1	军事	2.940	0.120	16.08
v_2	政府办公	5.850	0.500	8.05
v_3	科研	5.520	0.300	8.05
v_4	医院	2.180	0.500	33.48
v_5	大型工厂	3.221	0.404	10.74
v_6	商业中心	5.050	0.320	9.37
v_7	大型宾馆	2.790	0	9.37
v_8	科研	3.480	0.300	8.05
v_9	铁路	3.900	0.300	16.08
v_{10}	大型工厂	5.900	0.404	10.74
v_{11}	制药企业	5.430	0.404	10.74
v_{12}	钢铁化工	6.900	0.404	10.74
v_{13}	自来水公司	5.890	0	16.08

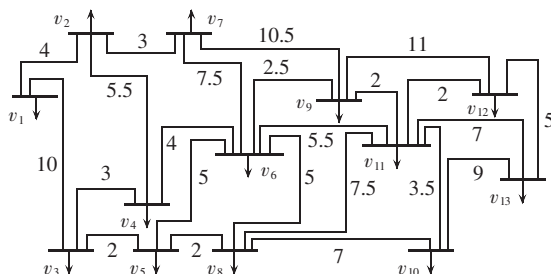


图 2 某区域电力应急服务点最优选址的网络图

Fig.2 Optimal disposal of power emergency service stations for a region

资源从应急服务点到各负荷点的运送时间不能超过 14.5 min(即 $t_l=14.5\text{ min}$)。

首先基于表 1 给出的负荷点数据,采用式(2)确定各个负荷点单位时间内的停电损失;由于各负荷点的停电概率已知,这样就可以确定各个负荷点单位时间内的停电风险值,其结果如表 2 所示。

表 2 各负荷点单位时间内的停电风险值
Tab.2 Power outage risk in unit time for different loads

负荷点 编号	停电风险 $R_i /$ (元·min ⁻¹)	负荷点 编号	停电风险 $R_i /$ (元·min ⁻¹)
v_1	45.35	v_8	25.60
v_2	43.07	v_9	57.89
v_3	42.02	v_{10}	59.03
v_4	56.25	v_{11}	53.98
v_5	30.25	v_{12}	69.77
v_6	44.32	v_{13}	94.71
v_7	26.14		

根据式(5)所描述的综合考虑电力应急时限和各负荷点停电风险的电力应急服务点选址优化模型,应用 Floyd 算法求出最小距离矩阵 S 和最短路径矩阵 W 。

从最小距离矩阵 S 的第 j 行中找出最大元素 s_{jk} ,然后再找出不在路径 $w(v_j,v_k)$ 上的次最大元素 s_{jl} 。根据式(8)得出各个顶点的局部半径的值如表 3 所示,并将其与电力应急最长时限 t_l 进行比较;若 $r(x_j) \leq t_l$,将局部中心点向 $w(x_j,v_k)$ 和 $w(x_j,v_l)$ 2 个方向移动,作为新的顶点,最后得到的新网络图见图 3。

表 3 各顶点局部半径的值
Tab.3 Local radius for different vertexes

顶点	局部半径 $r(x_j)/\text{min}$	顶点	局部半径 $r(x_j)/\text{min}$
v_1	23.00	v_8	14.25
v_2	12.50	v_9	12.50
v_3	15.00	v_{10}	19.25
v_4	12.50	v_{11}	14.75
v_5	14.50	v_{12}	12.50
v_6	12.50	v_{13}	17.00
v_7	15.25		

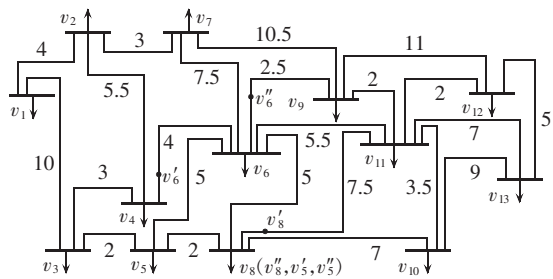


图 3 含各候选点的电力应急网络图
Fig.3 Power emergency service network with all candidate sites

由表 3 可看出,局部半径不大于 t_l 的顶点为 v_2 、 v_4 、 v_5 、 v_6 、 v_8 、 v_9 、 v_{12} ,且里面很多局部中心点是重复的。例如 v_2 、 v_4 、 v_6 、 v_9 、 v_{12} 这 5 个顶点所确定的局部中心点

均为一个点,且将该局部中心点向 2 个方向移动得到的新的顶点也相同,因此在图中只标记为 2 个点,即 v'_6 和 v''_6 ; v_5 确定的局部中心点与 v_8 重合,且不必移动;由 v_8 确定的局部中心点移动得到的新顶点 v'_8 和 v''_8 也在图 3 中做了标识。然后,结合各个顶点的风险值,确定出各个新顶点及新顶点连线上的原有顶点所对应的电力应急总风险值。最后,选择电力应急风险最小值所对应的点作为整个电力应急选址模型的最优解,并据此风险值对各个候选顶点进行排序,可得各个候选顶点的总风险值及排序结果如表 4 所示。

表 4 各候选应急点的总风险值及排序结果
Tab.4 All candidate sites sorted according to their total risk values

候选顶点	总风险值/元	排序
v'_6	5 157.6	3
v''_6	4 396.4	1
v'_8	5 739.2	5
$v_8(v'_8, v'_5, v''_5)$	5 633.5	4
v_6	4 418.9	2

对排序结果分析可看出,该电力应急服务点应该选在图中 v''_6 的位置,因为与该点对应的总风险值最小。此外, v_6 这个位置的总风险值也较小,与最优值差别不大,可作为备选电力应急服务点。若不考虑各个负荷点的停电风险差异,即取各个负荷点停电风险值相同,同样用式(5)所描述的优化模型求解,得到的最优选择位置为 v_6 ,其次为 v''_6 。这 2 种情况的结果不同,说明了在电力应急服务点选址时考虑负荷停电风险的必要性。因此,计及负荷停电风险能使得最终的选址结果更为合理,进而最大限度地减少停电损失。

6 结语

为加速电力系统应急平台建设,全面提高电力系统应急保障能力,本文首次对电力应急服务点的选址问题进行了比较系统的研究,发展了考虑负荷点停电风险的电力应急服务点选址优化模型并给出了求解方法。首先,根据负荷点信息确定其单位时间内的停电风险,然后将网络抽象成图并在同时考虑电力应急时限约束和各负荷点停电风险的情况下建立了电力应急服务点的选址优化模型,并用 Floyd 算法求解,最后用算例做了说明。所提出的考虑负荷停电风险的电力应急服务点选址模型更切合电力系统实际,在相当程度上克服了传统选址方法仅以应急时间最短为目标而可能造成实际损失较大的缺点,以最大限度降低停电损失。

本文只是对电力系统单个应急服务点的选址问题作了一些初步探索,还有很多问题亟待解决。例

如多个电力应急服务点的选址问题应该如何解决? 电力应急资源在各条应急路径上运送时间的不确定性因素应该如何考虑? 下一步将对这些问题展开深入研究。

参考文献:

- [1] ANDERSSON G, DONALEK P, FARMER R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928.
- [2] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1-4, 9.
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang. After the 2003 blackouts across several continents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-4, 9.
- [3] 李再华, 白晓民, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 1-3, 32.
LI Zaihua, BAI Xiaomin, DING Jian, et al. Analysis of the Western Europe blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 1-3, 32.
- [4] 傅书邈. IEEE PES 2004 会议电网安全问题综述及防止大面积停电事故建议[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 1-4.
FU Shutu. Summary on power system security problems on 2004 IEEE PES Meeting and recommendation for developing defense measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 1-4.
- [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, 55.
TIAN Shiming, CHEN Xi, ZHU Chaoyang, et al. Study on electric power emergency management platform[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 26-30, 55.
- [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, 25.
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, 25.
- [7] 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.
- [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] BOMPARD E, HUANG T, NAPOLI R. Emergency coordination and decision making over interconnected power systems[C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. San Antonio, Texas, USA: [s.n.], 2009: 3545-3551.
- [10] 叶品勇, 都洪基, 沈曦. Dijkstra 算法在最佳抢修路径计算中的应用[J]. 继电器, 2006, 34(12): 39-41, 51.
YE Pinyong, DU Hongji, SHEN Xi. Application of the Dijkstra algorithm in the best repairing path[J]. Relay, 2006, 34(12): 39-41, 51.
- [11] 张铭泉, 胥鸣, 秦文韬. 基于改进粒子群算法的电力通信网最佳抢修路径问题的研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(22): 5990-5995.
ZHANG Mingquan, XU Ming, QIN Wentao. Research of the best repair path based on an improved particle swarm optimization in power communication network[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(22): 5990-5995.
- [12] 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, 63.
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, 63.
- [13] 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.
- [14] NI Ming, MCCALLEY J D, VITTAL V, et al. Software implementation of online risk-based security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1165-1172.
- [15] 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.
- [16] 何建敏, 刘春林, 曹杰, 等. 应急管理与应急系统——选址、调度与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 43-48.
- [17] 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.

作者简介:

王 宏(1989-), 男, 湖北荆州人, 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: wanghong1989zju@gmail.com);

林振智(1979-), 男, 福建莆田人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为电力应急与电力系统恢复(E-mail: zhenzhi.lin@gmail.com);

文福拴(1965-), 男, 河南林州人, 特聘教授, 博士研究生导师, 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)。

(下转第 84 页 continued on page 84)

- bines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 18-22.
- [17] 陈振寰, 陈永华, 行舟, 等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(二)风火电“打捆”外送协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 12-15.
- CHEN Zhenhuan, CHEN Yonghua, XING Zhou, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms part two coordination control for shared transmission of wind power and thermal power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 12-15.
- [18] 关宏亮, 迟永宁, 王胜伟, 等. 双馈变速风电机组频率控制的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 61-65.
- GUAN Hongliang, CHI Yongning, WANG Shengwei, et al. Simulation on frequency control of doubly fed induction generator based wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 61-65.
- [19] 贺益康, 郑康, 潘再平, 等. 交流励磁变速恒频风电系统运行研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 55-59.
- HE Yikang, ZHENG Kang, PAN Zaiping, et al. Investigation on an AC excited variable speed constant frequency wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems,

2004, 28(13): 55-59.

作者简介:

翁毅选(1984-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、新能源接入后大电网自动发电控制(E-mail: Yixuan_Weng@163.com);

邓长虹(1963-), 女, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为大电网安全稳定分析及控制、新能源接入及电网智能控制、优化控制理论及电网规划、电力系统建模及数字仿真(E-mail: dengch-whu@163.com);

黄文涛(1984-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向为抽水蓄能建模及其在大电网中的应用、电力系统稳定与控制(E-mail: hwthwt1223@163.com);

肖永(1962-), 男, 贵州贵阳人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail: xiaoyong@gzsy.csg.cn);

颜霞(1970-), 女, 贵州贵阳人, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail: yanxia519@sina.com);

赵维兴(1979-), 男, 河南新乡人, 高级工程师, 研究方向为电网优化运行与控制。

Research of CPS based on statistical theory for interconnected power grid with wind power

WENG Yixuan¹, DENG Changhong¹, HUANG Wentao¹, XIAO Yong², YAN Xia², ZHAO Weixing²

(1. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Guizhou Power Grid Company, Guiyang 550002, China)

Abstract: The influence of wind power on the CPS(Control Performance Standard) evaluation indexes of interconnected power grid in China is researched based on the statistical theory. The mathematical expectation of key variables is used to transform the traditional CPS formula and the CPS evaluation indexes for quantitative analysis are deduced. A two-area interconnected power grid model is built with MATLAB/Simulink and the simulative results show that, the influence of wind power distribution on CPS index increases from normal distribution, t distribution to Weibull distribution; the bigger the interconnected power grid capacity becomes, the larger its CPS evaluation index drops.

Key words: statistics; wind power; CPS evaluation index; interconnected power grid; control

(上接第 78 页 continued from page 78)

Optimal siting of power emergency service station considering outage risk of loads

WANG Hong¹, LIN Zhenzhi¹, WEN Fushuan¹, XIANG Zhongming², GU Wei², WU Huahua²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China;

2. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract: A model for the optimal siting of power emergency service stations is developed with the consideration of power outage risk of loads, which is determined by the power shortage, load type and outage probability in unit time. The model takes the minimum total risk of all loads as its objective and introduces the overtime penalty factor into the time constraint of emergency service response when it can not be satisfied in practical conditions. Floyd algorithm is applied to solve the optimization model. Case study shows that, because the proposed model considers the difference of power outage risk among loads, the practical larger power outage cost is avoided, which may occur if only the minimum response time is taken as its objective.

Key words: power emergency service; optimal siting; outages; risks; Floyd algorithm; models; optimization