

面向最小配电块的配网可靠性通用矩阵评估算法

张 钊¹, 陆贤锋¹, 陈 昊²

(1. 上海市电力公司嘉定供电分公司, 上海 201800; 2. 江苏省电力公司南京供电公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 笔者采用面向最小配电区域的等值网络模型, 使计算元件数极大简化; 提出了基于分区模型的网络描述矩阵, 能迅速方便地划分出各类故障节点集; 最后归纳总结出网络可靠性指标的通用矩阵评估公式。该算法考虑了负荷熔断器和馈线断路器的不可靠开断、多备用电源的分布, 通过网络描述矩阵建立的可靠性评估矩阵公式具有较强的通用性, 将配电线路架空部分和电缆部分参数分开设置, 更加贴近应用实际。算例验证了该算法的可行性和高效性。

关键词: 可靠性; 配电网; 矩阵; 通用算法; 最小配电区域

中图分类号: TM727.2; TM732

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0044-05

A Generalized Matrix Algorithm for Reliability Evaluation of Distribution Network Orienting the Least Distribution Sections

ZHANG Zhao¹, LU Xian-feng¹, CHEN Hao²

(1. Jiading Power Supply Branch of SMEPC, Jiading District, Shanghai 201800, China;

2. Jiangsu Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: An equivalent model for distribution system is presented, which takes the least distribution sections as analytic elements to significantly simplify the components calculation. The describing matrix of network based on the sections model is proposed, with which all fault node sets can be quickly classified. Moreover, generalized matrix formulas for evaluating reliability indices of a distribution system are deduced. The algorithm takes sufficient special factors into account, such as misoperations of fuses or breakers, and multiple adjacent sources in network, and respectively assigns the parameters of overhead lines or cables, according to the actual situation. Example results show applicability and effectiveness of the algorithm.

Key words: reliability; distribution network; matrix; generalized algorithm; least distribution section

0 引言

统计资料显示^[1,2]: 大约 80% 的停电事故源于配电系统故障。因此, 对配电网可靠性的研究具有相当重要的意义。目前配电网可靠性分析计算方法分为两大类: 模拟法和解析法。基于计算机随机实验的蒙特洛法^[3,4]可求取可靠性指标的概率分布, 但为了满足模拟精度需进行较长时间的计算。解析法计算相对简单, 在配电系统可靠性评估中得到了广泛应用。其中最基本的方法是故障模式与故障后果分析法(FMEA)^[5,6], 适用于对简单辐射状主馈线系统进行评估。以 FMEA 法为基础, 学者陆续提出了最小路法^[7]、网络等值法^[8,9]、故障遍历算法^[10,11]等, 虽然和 FMEA 法比较, 采取了一些方法提高计算速度, 但仍然都是以单个元件为研究对象, 计算负荷点的可靠性指标, 随着配电系统规模的扩大, 分析将会变得十

分复杂。文[12-16]提出了对馈线以区域或块为单位分析故障模式的算法, 计算效率得到了明显提高, 是解析类算法中最为实用的模型。但是上述文献仅给出各类型故障节点定性的搜索策略, 未就其分布归纳构建出通用性强、易编程量化实现的数学描述, 对负荷支路熔断器和馈线断路器的不可靠熔断或跳闸均未作考虑, 未考虑多备用电源的分布, 也未考虑实际配电线路中电缆和架空线可靠性参数的分开配置。

笔者针对以上诸点加以改进, 全面综合地考虑了配电网可靠性评估的各项影响因素, 并将评估结果进行归纳演绎, 以通用矩阵公式的形式定量表达, 真正做到可靠性评估的通用性和高效性。

1 面向最小配电区域的网络描述矩阵

1.1 最小配电区域的概念和特性

定义 1: 开关装置决定了元件故障时可能隔离的

收稿日期: 2008-07-21; 修回日期: 2008-12-27

作者简介: 张 钊(1978), 男, 硕士, 工程师, 主要从事配电网自动化等相关工作。

最小区域,配电网中以开关装置(包括断路器、隔离开关、联络开关)为边界的子网络为最小配电区域。

若考虑潮流方向,整个配电网可视为以开关元件为弧边、最小配电区域为节点的有向图。潮流流入最小配电区域的开关元件弧边称为该区域流入弧,流出区域的弧称为流出弧,对于开环运行的配电网,一个最小配电区域有且仅有唯一一条流入弧。为尽可能减少最小配电区域数,该算法将大量装有熔断器的负荷支路计入相应的最小配电区域,最终求取各负荷点可靠性指标时,再予以相应修正。采取以上网络拓扑模型后,所分析的最小配电区域数较之原先的系统元件数大大减少,而且最小配电区域内设备的故障后果均相同,算法上也不存在精度的近似问题。

以图1所示上海某实际典型复杂配电网为例,结合图论拓朴理论阐述面向最小配电区域的网络描述矩阵的构建。图1中B₁~B₃为断路器;S₁~S₉为隔离开关;F₁~F₁₅为负荷支路首端的熔断器;LP₁~LP₁₅为负荷节点;N/O₁~N/O₂为联络开关。其中隔离开关为常闭运行,联络开关为常开运行。

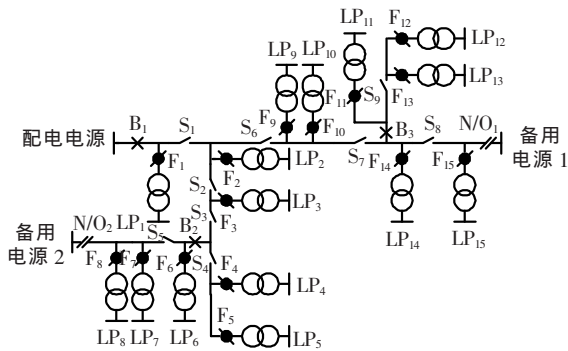


图1 上海某实际典型复杂配电网

1.2 面向最小配电区域的网络描述矩阵的定义

根据1.1节所述的有关定义,图1可等效简化为图2所示的面向最小配电区域的拓扑连接,图2中Q₁~Q₁₂为最小配电区域节点的编号。文[17]给出了一个可行的最小配电区域分解流程。

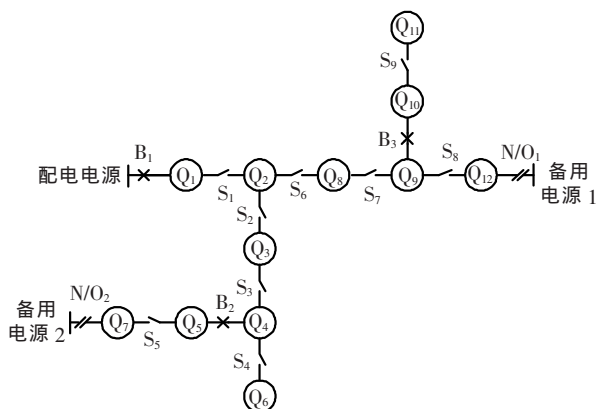


图2 基于最小配电区域的典型配电网简化模型

图2简单明了的给出了配电系统的分区情况,基于此可形成面向区域模型的网络描述矩阵,它实际上描述了各最小配电区域的连接关系。

定义2:A、B为一配电系统中直接相连的两最小配电区域节点,若潮流由区域A流向区域B,则称节点A为节点B的父节点,节点B为节点A的子节点。

设简化模型中最小配电区域节点数为N,计及正常运行方式下潮流方向,构建面向最小配电区域的网络描述矩阵M用于描述最小配电分区的拓扑连接关系,记M=[m_{ij}]_{N×N}。

矩阵M非对角元的定义为

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & j \text{ 是 } i \text{ 的子节点,且以隔离开关连接} \\ 2 & j \text{ 是 } i \text{ 的子节点,且以断路器连接}(i \neq j) \\ 0 & j \text{ 与 } i \text{ 无父子关系} \end{cases}$$

矩阵M对角元的定义为

$$m_{ii} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 和备用切换电源相邻} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 和备用切换电源不相邻} \end{cases}$$

构建该描述矩阵后,可将基于最小配电区域的网络拓扑结构以及相邻备用联络电源的分布情况通过矩阵元素的量化简单明晰地表达出来。

由以上规则,不难形成描述图2区域节点拓扑关系的矩阵M

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1.3 最小配电区域的可靠性参数

最小配电区域可视为一等值元件,实质是网络中相邻分布的开关元件之间所有串联线路元件的集合。

设最小配电区域k中串联架空线路总长为d_{ka},串联电缆总长为d_{kb};架空线单位长度故障率为λ_{a0},电缆单位长度故障率为λ_{b0};架空线故障修复时间为t_a,电缆故障修复时间为t_b;另假设区域节点k中含有n_k个负荷支路,p_{kif}为区域节点k中负荷支路i上断路器不可靠动作率,λ_{ki}为区域节点k中负荷支路i中元件故障率,t_{ki}为区域节点k中负荷支路i中配电变压器元件故障修复时间。

考虑到负荷支路熔断器不可靠熔断时对相应最小配电区域块的可靠性指标的影响,由此得到最小

配电区域 k 的等效故障率 λ_k , 年平均停运时间 t_k , 故障修复时间 r_k 分别为

$$\lambda_k = \lambda_{a0} d_{ka} + \lambda_{b0} d_{kb} + \sum_{i=1}^{n_k} p_{kif} \lambda_{ki} \quad (1)$$

$$t_k = \lambda_{a0} d_{ka} t_a + \lambda_{b0} d_{kb} t_b + \sum_{i=1}^{n_k} p_{kif} \lambda_{ki} t_{ki} \quad (2)$$

$$r_k = t_k / \lambda_k \quad (3)$$

2 可靠性评估的通用矩阵算法

2.1 计及故障后果的最小配电区域的分类

对某一最小配电区域 k 作可靠性评估之前, 还必须明确配网系统中其它区域块故障后, 对该区域的影响特性。根据故障后对该区域造成的停役时间长短, 可将系统中配电区域块作如表 1 所示的分类。

表 1 最小配电区域的故障分类

类别	故障造成停役时间
A	影响停役时间为故障区域块元件的修复时间 r_k
B	影响停役时间为联络开关切换至备用电源耗费的时间 t_{cb}
C	影响停役时间为隔离开关隔离故障区域的耗时间 t_{cf}
D	影响停役时间为 0

2.2 各类最小配电区域行向量的建立

对于某配电系统, 其供电电源点为 E_g , 主馈线上末端连接的备用电源点为 E_{b1} , 最小配电区域 k 至点 E_g 可唯一确定一条供电路径集 Ω_k , 点 E_{b1} 至点 E_g 也唯一确定一条路径集 Ω_b , 令两条路径相交点为区域节点 f 。由拓扑连接归纳可知, 供电电源点 E_g 和点 f 之间的区域元件故障, 对最小配电区域 k 造成停电性质为 B 类。备用电源点 E_{b1} 和点 f 之间的区域元件故障, 对最小配电区域 k 造成停电性质为 C 类。搜索 k 节点及其下游区域, 若没有任何区域节点和某相邻备用电源连接, 则从 k 节点的父节点重新开始搜索, 依次下去, 直至搜索到点 f ; 设首次搜索到某区域 g 其下游有节点和备用电源连接, 则点 f 到点 g 父节点路径上的相关节点为 B 类元件, 节点 g 到节点 k 路径上元件为 A 类元件; 其余区域元件的类别判据是: 深度优先搜索并集 $\Omega_k \cup \Omega_b$ 中的子节点区域, 若首次碰到和断路器元件连接的子节点时继续搜索, 直至第二次搜索到断路器连接的子节点时则停止该方向搜索过程并返回至当前父节点, 待上述搜索全部结束后所遍历元件为 C 类节点, 剩余其它为 D 类节点。以上判据的物理意义是故障分支馈线的断路器不可靠跳闸时对上级馈线可靠性产生影响, 但同时假定馈线断路器连续两级拒动的概率为 0。假设该深度优先搜索过程中, 所遍历分支馈线断路器元件下游子节点集合为 Ω_k' 。

1.2 节中构造了面向最小配电区域的网络描述

矩阵 M , 利用其元素的拓扑意义, 可方便地导出基于最小配电区域 k 的各类最小配电区域行向量。配网闭环设计, 开环运行, 除和配网电源点相连的首段区域块外, 某一配电区域节点有且仅有唯一父区域节点。就矩阵 M 中对应元素而言, 即某列 (除首列外) 仅存在唯一非零元, 其非零元的行号就是其父节点编号。

例如研究对象为图 2 中配电区域块 Q_4 , 将初始路径置为 $\Omega_4=[4]$ 后, 在矩阵 M 的第 4 列找到非零元 m_{34} , 将 m_{34} 的行下标 $i=3$ 放入 $\Omega_4=[3, 4]$; 然后, 在矩阵 M 的第 3 列找到非零元 m_{23} , 将 m_{23} 的行下标 $i=2$ 放入 $\Omega_4=[2, 3, 4]$; 最后, 在矩阵 M 的第 2 列找到非零元 m_{12} , 将 m_{12} 的行下标 $i=1$ 放入 Ω_4 。此时已搜索到配网电源点相连的首段区域块, 搜寻结束, 最后形成最小配电区域 4 至电源点 E_g 完整供电路径 $\Omega_4=[1, 2, 3, 4]$ 。类似地, $\Omega_b=[1, 2, 8, 9, 12]$ 。两者交集 $\Omega_4 \cap \Omega_b=[1, 2]$, 剔除最末端交汇 f 点元素 2 后所得集合 $J_{4B}^{(1)}=[1]$ 属于 B 类集合; $\Omega_4 - J_{4B}^{(1)}=[2, 3, 4]$, 从节点 4 对应的第 4 行开始搜索, 搜索得 $m_{45}=1, m_{57}=1, m_{77}=1$, 说明 4 区域节点下游子节点 7 和其余备用电源连接, 所以 2、3 节点集合 $J_{4B}^{(2)}$ 也属 B 类区域。综上 B 类元素集合为 $J_{4B}=J_{4B}^{(1)}+J_{4B}^{(2)}$; $J_{4A}=[4]$ 。剩余最小配电区节点均属 C 类节点, 即 $J_{4C}=[5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]$ 。通过 $\Omega_4 \cup \Omega_b$ 中经由断路器连接的子节点搜索, 即矩阵中 $m_{ij}=2$ 的相关节点及其子节点, 可得出 $\Omega_4'=[5, 7, 10, 11]$ 。由此逐个分区进行分析, 可由网络描述矩阵 M 快速定位出各分区相对应故障区域类型。一般地, 设网络分区数为 N 。

定义 3: 基于 k 节点 N 维 A 类行向量 U_k

$$u_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{当 } i \in J_{kA} \\ 0 & \text{当 } i \notin J_{kA} \end{cases} \quad (i=1 \cdots N)$$

同理定义基于 k 节点 N 维 B、C 类行向量 V_k, W_k 和 Ω_4' 对应的 N 维行向量 Y_k 。

2.3 基于通用矩阵量化的区域等值元件的可靠性评估

2.3.1 区域等值元件的故障率评估

由于基于区域 k 节点的 A、B、C 类节点故障都会引起 k 节点停电, 所以它们对评估 k 节点故障率的权重相当, 可合并考虑; 仅需特别考虑行向量 Y_k 对应节点类的故障后果, 它们故障后只有在对应馈线首段断路器不可靠跳闸后才引起 k 节点停电, 所以权重因子为断路器不可靠跳闸率 p_B 。

定义 4: 最小配电区域等效故障率参数行向量为

$$\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_N]$$

定义 5: 最小配电区域年停电频率行向量为

$$F = [F_1, F_2, \cdots, F_N]$$

定义 6: A 类节点关联矩阵为

$$U^T = (U_1^T, U_2^T, \cdots, U_N^T)$$

定义7: B类节点关联矩阵为

$$V^T=(V_1^T, V_2^T, \dots, V_N^T)$$

定义8: C类节点关联矩阵为

$$W^T=(W_1^T, W_2^T, \dots, W_N^T)$$

定义9: Ω_k' 对应类节点关联矩阵为

$$Y^T=(Y_1^T, Y_2^T, \dots, Y_N^T)$$

上述表达式中上标代表矩阵或向量的转置运算。则

$$F^T=(U+V+W-Y) \times \lambda^T + p_B \times Y \times \lambda^T \quad (4)$$

2.3.2 区域等值元件年期期望停电时间量评估

设最小配电区域等效修复时间参数对角元矩阵 $R=diag[r_1, r_2, \dots, r_N]$, 年期期望停电时间向量 $T=[T_1, T_2, \dots, T_N]$, 联络开关切换至备用电源耗费的时间设为 $t_{切}$, 隔离开关隔离故障区域的耗费时间设为 $t_{分}$, 则

$$T=[U \times R + V \times t_{切} + (W - Y + p_B Y) \times t_{分}] \times \lambda^T \quad (5)$$

利用通用矩阵计算公式(4)、(5)计算出等值区域元件 k 的可靠性指标 F_k, T_k 后, 需修正为元件 k 中任意负荷点的可靠性指标。公式为

$$F_{ki}=F_k + (1-p_{kif}) \lambda_{ki} \quad (6)$$

$$T_{ki}=T_k + (1-p_{kif}) \lambda_{ki} t_{ki} \quad (7)$$

负荷点平均故障持续时间

$$D_{ki}=T_{ki}/F_{ki} \quad (8)$$

每个负荷点可靠性指标都可逐一修正计算, 利用上述量值可进一步求出系统侧可靠性指标: 系统平均停电频率(SAIFI)、系统平均停电持续时间(SAIDI)、用户平均停电持续时间(CAIDI)和平均供电可靠度(ASAI)等。

笔者提出的面向最小配电块的配电网可靠性通用矩阵评估算法流程见图3。

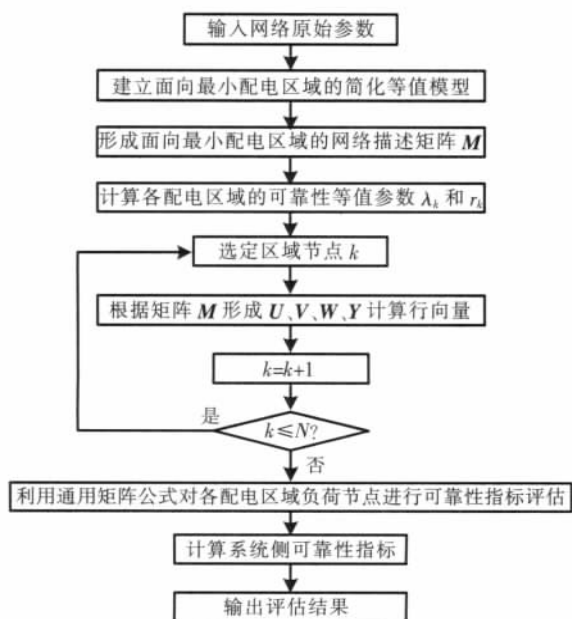


图3 面向最小配电块的配电网可靠性通用矩阵评估算法流程图

3 算例

采用文中的可靠性评估算法对图1所示的上海

某10 kV配电网的典型馈线进行可靠性评估。图中有15个10/0.4 kV配电变压器, 配电变压器总容量为4 150 kV·A。每块最小配电区域中架空线、电缆的各自长度见表2, 元件可靠性参数见表3。负荷点均为工业用户, 用户数为1。分别对以下4种情况进行计算。

表2 线路结构及长度

k	d _{ka} /m	d _{kb} /m	k	d _{ka} /m	d _{kb} /m	k	d _{ka} /m	d _{kb} /m
1	98	-	5	65	30	9	67	-
2	156	53	6	208	107	10	76	-
3	125	-	7	234	90	11	198	97
4	101	-	8	206	104	12	159	89

表3 元件可靠性基本参数

元件类型	λ	$t/(h \cdot \text{次}^{-1})$	p	$t_{切}/h$	$t_{分}/h$
架空线	0.080	3.0	-	-	-
电缆	0.042	4.0	-	-	-
熔断器	-	-	0.05	-	-
断路器	-	-	0.05	-	-
变压器	0.015	3.5	-	-	-
隔离开关	-	-	-	-	0.5
联络开关	-	-	-	1.0	-

注: λ 为架空线和电缆每千米·年的元件故障率或变压器每台·年的元件故障率; p 为断路器和熔断器的不可靠跳闸率或熔断率。

情况1: 线路有联络备用电源, 考虑断路器和熔断器的不可靠跳闸和熔断;

情况2: 线路有联络备用电源, 不考虑断路器和熔断器的不可靠跳闸和熔断;

情况3: 线路仅有联络备用电源1, 不考虑断路器和熔断器的不可靠跳闸和熔断;

情况4: 线路无备用电源, 考虑断路器和熔断器的不可靠跳闸和熔断。

列出部分计算结果, 见表4、5。

从算例可知, 该算法通用性极好, 能灵活适用于配电网各种实际情形下的可靠性评估。从上表计算数据对比可知, 情况2的可靠性指标最优; 情况1考虑熔断器和断路器的不可靠熔断或跳闸时, 可靠性指标次之; 情况3将备用电源数减为1, 则系统可靠性进一步下降; 情况4中, 网络既无联络电源, 熔断器和断路器也不能完全可靠动作, 因此可靠性最差。所以综合考虑以上这些因素, 形成通用算法是准确评估可靠性所必需的。

为验证本算法的高效性, 针对情况3, 同时运用文[16]算法进行评估。评估结果及耗时情况的对比见表6。

从上述对比, 可看出算法的优越性, 随着网络元件的增加, 算法的快速性更为明显。文中算法将负荷支路也并入配电区域, 最大限度减少了计算元件; 以网络描述矩阵为基础的矩阵算法能快速定位形成各

表 4 部分负荷点可靠性指标评估结果

情况	LP ₃		LP ₄		LP ₇		LP ₁₂		LP ₁₄	
	$F/(次 \cdot a^{-1})$	$T/(h \cdot a^{-1})$	$F/(次 \cdot a^{-1})$	$T/(h \cdot a^{-1})$	$F/(次 \cdot a^{-1})$	$T/(h \cdot a^{-1})$	$F/(次 \cdot a^{-1})$	$T/(h \cdot a^{-1})$	$F/(次 \cdot a^{-1})$	$T/(h \cdot a^{-1})$
1	0.128 40	0.146 22	0.128 40	0.206 38	0.158 05	0.214 05	0.155 23	0.312 34	0.128 40	0.145 80
2	0.119 43	0.140 99	0.119 43	0.198 52	0.148 39	0.202 77	0.145 42	0.209 71	0.119 43	0.139 81
3	0.119 43	0.172 62	0.119 43	0.250 15	0.148 39	0.284 74	0.145 42	0.209 71	0.119 43	0.139 81
4	0.128 40	0.179 74	0.128 40	0.261 76	0.158 05	0.298 95	0.155 23	0.312 34	0.128 40	0.145 80

表 5 系统可靠性指标

情况	SAIFI/ [次·(a·户) ⁻¹]	SAIDI/ [h·(a·户) ⁻¹]	CAIDI/ [h·(次·户) ⁻¹]	ASAI/%
1	0.139 70	0.193 15	1.382 59	99.997 80
2	0.130 42	0.173 76	1.332 31	99.998 02
3	0.130 42	0.198 20	1.519 71	99.997 74
4	0.139 70	0.225 44	1.613 74	99.997 43

表 6 算法评估指标对比

指标	SAIFI/ [次·(a·户) ⁻¹]	SAIDI/ [h·(a·户) ⁻¹]	ASAI/%	运算时间/s
文中	0.130 42	0.198 20	99.997 74	0.006 35
文[16]	0.130 42	0.198 20	99.997 74	0.023 49

类元件向量,利用标准公式模块化编程求解,运算效率大大提高。

4 结论

(1)文中采用面向最小配电区域的等值网络模型,且将负荷支路合并其中,最大程度简化了网络元件数。

(2)文中考虑了负荷熔断器和馈线断路器的不可靠开断,多重备用电源的分布,并将配电网架空部分和电缆部分参数分开设置,符合了物理情景的通用性。

(3)归纳建立了矩阵评估算法,数学形式上通用简洁.利用它,实现了可靠性评估求解时高效的模块化编程问题。

(4)网络描述矩阵的构建使得搜寻节点集过程计算迅速,从而算法性能具有高效性。

(5)基于操作元件的低故障率,文中的可靠性评估算法忽略动态开关类元件的故障影响,今后的通用算法研究中可逐步将这些因素也考虑进来,使形式上更为完善。

参考文献:

[1] BILLINTON R, BILLINTON J E. Distribution System

Reliability Indices[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(1): 561-568.

[2] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.

[3] 丁明, 张静, 李生虎. 基于序贯蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 38-42.

[4] GOEL L, OU Y. Radial Distribution System Reliability Worth Evaluation Utilizing the Monte Carlo Simulation Technique[J]. Computers and Electrical Engineering, 2001, 27(3): 273-285.

[5] 别朝红, 王秀丽, 王锡凡. 复杂配电系统的可靠性评估[J]. 西安交通大学学报, 2000, 24(8): 9-13.

[6] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARRIEF I, et al. A Reliability Test System for Educational Purposes Basic Distribution System Data and Results[J]. IEEE Transaction on Power System, 1991, 6(2): 813-820.

[7] 戴雯霞, 吴捷. 基于最小路的配电网可靠性快速评估法[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(7): 29-31.

[8] BILLINTON R, WANG P. Reliability Network Equivalent Approach to Distribution System Reliability Evaluation[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(2): 149-153.

[9] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48-52.

[10] 徐珍霞, 周江昕. 复杂配电网可靠性评估的改进故障遍历法[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 64-67.

[11] 谢开贵, 周平, 周家启, 等. 基于故障扩散的复杂中压配电系统可靠性评估算法 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 45-48.

[12] 徐珍霞, 顾洁. 一种配电网拓扑分析方法及其在可靠性评估中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(19): 41-44.

[13] 谢开贵, 易武, 夏天, 等. 面向开关的配电网可靠性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 40-44.

[14] 周念成, 谢开贵, 周家启, 等. 基于最短路的复杂配电网可靠性评估分块算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22):39-44.

[15] 束洪春, 刘宗兵, 胡泽江. 基于复杂辐射状配电系统简约模型的可靠性评估算法[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 66-70.

[16] 刘柏私, 谢开贵, 马春雷, 等. 复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 40-45.

[17] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.