

考虑元件故障率变化的配电网可靠性评估

赵洪山, 赵航宇

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对实际运行的配电网中元件发生故障的概率会随其运行时间而变化, 提出一种考虑元件非恒定故障率的配电网可靠性指标计算方法, 结合配电网元件运行时间与发生故障次数的数据, 提出用改造威布尔分布拟合元件故障率随时间变化过程。在此基础上, 用馈线区、元件、负荷三类数据结构表示配电网拓扑结构和参数, 将故障后的系统分为故障区域、前向区域、后向区域和无影响区域。对每个元件发生故障后的系统进行区域划分, 建立FMEA表。最后, 采用序贯蒙特卡洛模拟法计算可靠性指标, 模拟过程中考虑了元件的实时故障率。以IEEE RBTS BUS6母线为算例, 计算结果验证了该方法的有效性。

关键词: 配电网; 可靠性; 故障率; 序贯蒙特卡洛模拟法; FMEA

Distribution system reliability analysis considering the elements failure rate changes

ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu

(Department of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In view of the failure rate of a component in distribution system varying with its working time, this paper puts forward a distribution system reliability indices calculation method considering the elements failure rate changes. Combined with the failure times and working time data of components, reconstructive Weibull distribution is established to fit the component failure rate change process. On this basis, the method presents three types of data structures, namely segment data structure, element data structure and load point data structure to represent the topological structure and parameters of the distribution system. When fault occurs, the distribution system will be divided into four types of areas, namely fault area, forward area, backward area and unaffected area. The distribution system is divided after each element breaks down and then the FMEA table is established. At last, time sequential Monte Carlo simulation is used to calculate the reliability indices, the real-time failure rate is considered during simulation. Taking the IEEE RBTS BUS6 for example, the effectiveness of the proposed method is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077053).

Key words: distribution system; reliability; failure rate; sequential Monte Carlo simulation; FMEA

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)11-0056-07

0 引言

配电网处于供电系统末端, 直接与用户相联, 电力系统对用户的供电可靠性一般都需要通过配电网来体现。据不完全统计, 用户的停电事件中有80%是由配电系统的故障引起的^[1]。随着用户对供电可靠性要求的提高, 配电网可靠性也成为考核供电企业的一项重要技术经济指标^[2]。

配电网可靠性评估的基本方法是故障模式后果分析法(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)。该方法对所有可能出现的故障进行分析, 确定每种

故障的影响, 形成故障影响报表。FMEA故障影响报表是可靠性分析的基础, 文献[3]采用最小割集法对含环网的配电系统进行可靠性评估, 文献[4-5]利用GO方法分别计算了复杂配电系统和含分布式电源接入的配电系统可靠性指标, 文献[6]对分析了电池储能系统的可靠性, 并对其接入后的配电系统进行可靠性评估, 文献[7-11]采用蒙特卡洛模拟法计算配电系统以及含微网接入的配电系统可靠性指标, 这些方法实际上都对配电网进行了故障模式影响分析。

蒙特卡洛仿真因其灵活性而在大电网可靠性评估的系统状态抽取中占据了重要位置, 其中非序贯

蒙特卡洛仿真和序贯蒙特卡洛仿真已得到比较深入的研究和应用^[12]。该方法是以元件故障率为基础, 用随机概率进行故障拟合, 通过计算机产生的随机数对元件的状态进行抽样, 进而组合得到系统的状态。当模拟时间足够长时, 可以忽略这种随机性产生的误差。

以往文献在计算配电系统可靠性指标时往往忽略了元件故障率随时间的变化, 认为其是一个恒定的常数, 而配电网实际运行过程中, 元件的故障率是一个随时间变化的分布。据此本文根据配电网各元件故障率的统计分布, 用改造后的威布尔分布来拟合故障率的变化, 在序贯蒙特卡洛仿真的过程中考虑元件的实时故障率, 提出了更符合实际情况的可靠性指标计算方法。

1 配电网元件运行状态模型

配电网中大部分元件属于可修复元件, 其状态变化过程可以通过“运行-故障-运行”来模拟, 采用双态模拟描述配电网元件状态, 如图1所示。对于元件检修的情况, 可以认为是元件故障情况的一种特例, 其故障修复时间视具体检修情况而定。

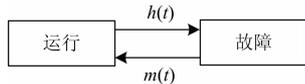


图1 元件双态模型

Fig. 1 Elements two-state model

1.1 元件故障模型

可靠度 $R(t)$ 是指元件在起始时刻正常工作条件下, 在时间 $[0, t)$ 内不发生故障的概率。故障率 $h(t)$ 指元件从起始时刻直至时刻 t 完好, 在时刻 t 以后的单位时间内发生故障的概率。根据条件概率公式, 可以推导出 $R(t)$ 与 $h(t)$ 的关系, 如式(1)所示。

$$h(t) = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (1)$$

电力系统中的元件故障率可选用适当参数的威布尔分布来模拟^[13], 表达式为

$$h(t) = Kt^{\beta-1} \quad t > 0 \quad (2)$$

式中: K 为标度参数; β 为形状参数。当 $0 < t \leq T_1$ 时, $\beta = \beta_1 < 1$, $h(t)$ 随 t 的增加而减小; 当 $T_1 < t \leq T_2$ 时, $\beta = \beta_2 = 1$, $h(t)$ 为常数; 当 $T_2 < t \leq T_3$ 时, $\beta = \beta_3 > 1$, $h(t)$ 随 t 的增加而增大; 但是在耗损故障期, 如果威布尔分布的形状参数 β 大于 2, 则故障率上升速度太快, 与实际情况不相符; 如果形状参数 β 介于 1 至 2 之间, 则曲线呈“上凸”状, 与元件老化时故障率上升速度越来越快的情况相违

背。因此对威布尔分布进行适当改造, 改造后的故障率分布如式(3)所示。

$$h(t) = Ke^{\beta t} \quad t > 0 \quad (3)$$

其中, K 为初始故障率, 整个故障率分布曲线在时间上是连续的。当 $0 < t \leq T_1$ 时, $\beta = \beta_1 < 0$, $h(t)$ 随 t 的增加而减小; 当 $T_1 < t \leq T_2$ 时, $\beta = \beta_2 = 0$, $h(t)$ 为常数; 当 $T_2 < t \leq T_3$ 时, $\beta = \beta_3 > 0$, $h(t)$ 随 t 的增加而增大。配电网元件的故障率分布均可用一定参数的改造威布尔分布来拟合。根据统计规律, 对于配电变压器、馈线、断路器和隔离开关, 其故障率分布呈完整的浴盆曲线状; 而对于熔断器, 其接入电网时的“磨合”时间近似为零, 即 $T_1=0$ 。以变压器和馈线为例, 结合文献[14-15]中数据, 变压器的故障率分布参数为 $T_1=2$, $T_2=15$, $T_3=30$, $\beta_1=-0.2$, $\beta_2=0$, $\beta_3=0.17$, $K=0.02$, 其故障率分布如图2(a)所示; 馈线的故障率分布参数为 $T_1=10$, $T_2=15$, $T_3=30$, $\beta_1=-0.02$, $\beta_2=0$, $\beta_3=0.08$, $K=0.06$, 其故障率分布如图2(b)所示。

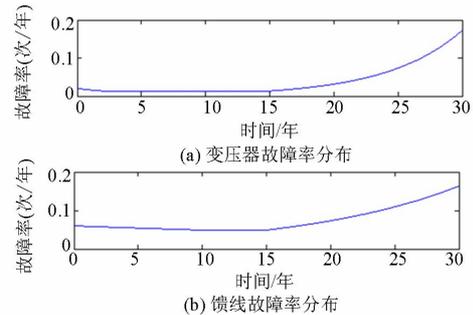


图2 变压器、馈线故障率分布

Fig. 2 Transformer and feeder failure rate distribution

1.2 元件修复模型

修复概率 $G(t)$ 指元件在起始时刻故障的条件下, 在 $(0, t]$ 时间内被修复的概率。修复率 $m(t)$ 指元件在起始时刻直至时刻 t 故障, 而在时刻 t 后的单位时间内被修复的概率。当 $m(t)$ 为常数 μ 时, 根据条件概率公式, 可以推导出 $G(t)$ 与 μ 的关系, 如式(4)所示。

$$G(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (4)$$

对于一个元件, 通常其平均修复时间 MTTR 是已知的, MTTR 与修复率 μ 互为倒数关系, 即

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

所以给定一个元件的修复概率, 就可以通过式(4)、式(5)求出其修复时间。

2 配电网故障模式影响分析

2.1 可靠性分析的数据结构

配电网主要元件包括馈线、配电变压器、断路器、隔离开关和熔断器等，具有元件数量多、结构复杂的特点。为了方便配电网故障模式影响分析，本文在馈线区(Segment)的概念的基础上构建用于配电网可靠性分析的数据结构^[16]。

馈线区是具有共同入口元件的集合，入口元件为开关或保护装置，且每一个馈线区只包括一个开关或保护装置^[17]。馈线区内的某个元件发生故障时，该馈线区其它元件也会失去供电，直至故障元件修复才能恢复供电。由于馈线区内元件具有共同入口元件，馈线区外元件发生故障，馈线区内元件的停电时间也是相同的，因此同一馈线区内所有元件和负荷点具有相同的可靠性水平。根据定义，图3所示配电网分为6个馈线区。

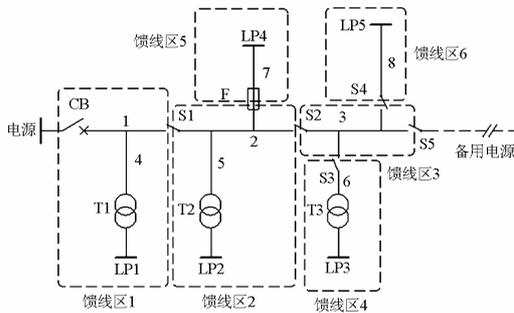


图3 馈线区划分示例

Fig. 3 A sample of dividing the segment

为了分析配电网的供电可靠性，构建三类数据结构，分别为馈线区、负荷和元件，如图4所示。馈线区结构如图4(a)所示，由编号、编码和是否含有备用电源三个字段组成。编号为馈线区的序号；是否含有备用电源指该馈线区是否直接和备用电源相连接，如果是则为“1”，否则为“0”；编码^[18]体现了馈线区在网络中的拓扑位置，编码结构如图5所示。

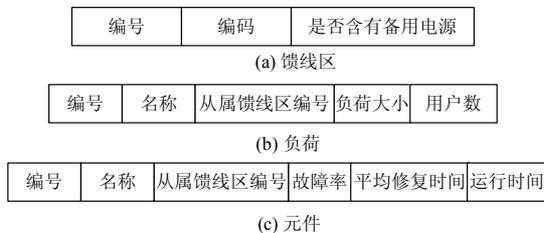


图4 馈线区、负荷、元件数据结构示意图

Fig. 4 Data structure diagram of the segment, the load point and the element

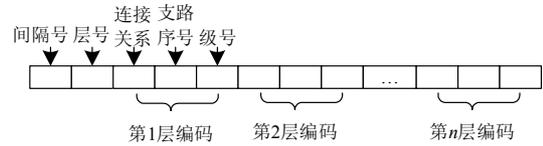


图5 馈线区编码结构示意图

Fig. 5 Code diagram of the segment

图5中，间隔号用于标识该馈线区属于哪条总馈线；层号指该馈线区属于第几层；连接关系用于标识该馈线区与上一馈线区的连接方式，用“1”表示通过隔离开关相连，“2”表示通过断路器相连，“3”表示通过熔断器相连；支路序号指该馈线区的分支序号，用于区分同一层中并联的馈线区；级号指该馈线区属于第几级，用于区分同一层中的串联馈线区。根据定义，图3中各馈线区数据结构如表1所示。

表1 馈线区数据结构

Table 1 Data structure of the segment

编号	编码	是否含有备用电源
1	[1,1,2,1,1]	0
2	[1,2,2,1,1,1,1,1]	0
3	[1,3,2,1,1,1,1,1,1,1]	1
4	[1,4,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]	0
5	[1,3,2,1,1,1,1,1,3,1,1]	0
6	[1,4,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1]	0

负荷结构如图4(b)所示，由编号、名称、从属馈线区编号、负荷大小和用户数字五个段组成，分别用于存储负荷点的相关数据。

元件结构如图4(c)所示，由编号、名称、从属馈线区编号、故障率和平均修复时间六个字段组成。元件通常包括馈线、配电变压器、断路器、隔离开关和熔断器，其中馈线和配电变压器只从属于一个馈线区。而开关元件，包括断路器、隔离开关和熔断器从属于与其直接相连的两个馈线区。元件的故障率参数共有7个，分别为1.1节所述的 T_1 、 T_2 、 T_3 、 β_1 、 β_2 、 β_3 和 K 。元件的运行时间指元件在配电网中的实际无故障运行时间，是一个变化的量，初始值为0。

负荷结构和元件结构通过从属馈线区编号字段与馈线区结构相关联。通过这三个数据结构，可以将配电网的拓扑结构，元件和负荷点的所有信息形成了统一的整体，为下文故障模式影响分析带来方便。

2.2 故障区域的划分

当配电网内某个元件发生故障时，根据各个馈线区受影响的差异，可将其分为四类区域。

a) 故障区域(A类区域)：在故障修复前无法从主电源或备用电源获得电能的区域。

b) 后向区域(B类区域)：位于故障区域的下游，

根据是否可以从备用电源或得电能分为B1类区域和B2类区域。B1类区域与备用电源之间存在联络；B2类区域与备用电源间不存在联络。

c) 前向区域(C类区域): 位于故障上游, 故障隔离后, 前向区域仍可与主电源形成回路。

d) 无影响区域(D类区域): 除去前面三类区域, 余下区域为无影响区域, 该区域不会发生停电事故。

2.3 FMEA表的建立

2.3.1 非开关元件发生故障

根据给定的数据结构, 当非开关元件发生故障时, 划分四类区域具体步骤如下:

1) 找出故障元件从属馈线区, 该馈线区编码记为 m , 确定馈线区所在的间隔号, 故障间隔号内所有馈线区集合记为 S , 非故障间隔号内的馈线区为D类区域。

2) 遍历集合 S 中的每个馈线区。

3) 若馈线区编码与 m 相同, 则属于A类区域; 若馈线区编码只比 m 多一层, 而多出的这层与故障区通过熔断器相连, 且是第一级, 则属于A类区域。

4) 若馈线区编码层数比 m 高且完全继承 m 的信息, 则属于B类区域; 若馈线区层数与 m 相同, 除了最后一位编码大于 m 外其余编码与 m 相同, 则属于B类区域。

5) 找出距离故障元件最近的上游断路器或熔断器所在层数 k 。若馈线区编码的第3位至第 $3k+1$ 位与编码 m 的这些位完全相同, 则属于C类区域。

6) 不满足步骤3)、4)、5)中条件的区域属于D类区域。

7) 将B类区域按全部失去联通性准则(Total Loss of Continuity, TLOC), 即只有当负荷点和所有电源之间全部断开时才失去供电, 分为B1类区域和B2类区域, 具体步骤如流程如图6所示。

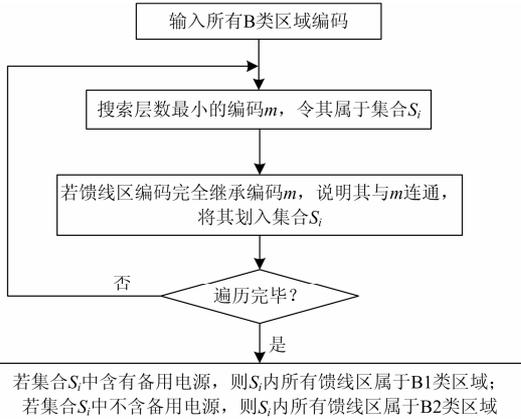


图6 TLOC准则下B1、B2类区域的划分流程图

Fig. 6 Flow chart of dividing B1, B2 area under the TLOC guidelines

2.3.2 开关元件发生故障

当开关元件发生故障时, 等同于其从属的两个馈线区均发生故障。对其从属的两个馈线区发生故障进行区域划分, 结果分别为 A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 和 A_j 、 B_j 、 C_j 、 D_j , 则开关元件故障区划分的结果为A类区域为 A_i 和 A_j 的并集, D类区域为 D_i 和 D_j 的交集, B类区域为 B_i 与 A_j 的差集并上 B_j 与 A_i 的差集, 即 $B = (B_i - A_j) \cup (B_j - A_i)$ 。最后, 按照步骤7)将B类区域划分为B1和B2类区域。

2.3.3 FMEA表的建立

根据以上分析, 对每个元件发生故障情况进行分析, 查找其从属馈线区, 对该馈线区发生故障后的配电网进行故障区域划分, 然后找出每个负荷点所在馈线区的故障区域类型, 建立如表2所示的FMEA表。表中第 i 行 j 列数据“N”为元件 i 发生故障时负荷点 j 的故障区域类型。

表2 FMEA表

Table 2 The FMEA table

	LP1	LP2	...	LPn
元件1	N	N	N	N
元件2	N	N	N	N
⋮	N	N	N	N
元件m	N	N	N	N

3 蒙特卡洛法计算配电网可靠性指标步骤

3.1 可靠性指标

常用的负荷点可靠性指标有: 平均故障率 λ 、平均停电时间 r 、年平均停电时间 U ; 常用的系统可靠性指标有: 系统平均停电频率指标 SAIFI、用户平均停电时间指标 CAIFI、系统平均停电持续时间指标 SAIDI、用户平均停电持续时间指标 CAIDI、平均供电可用率指标 ASAI、系统总电量不足指标 ENS 等。

3.2 元件 TTF 和 TTR 的计算

根据第1节所述, 元件的可靠度 $R(t)$ 和元件的修复概率 $G(t)$ 是 $[0, 1]$ 区间内的一个概率值, 因此可以通过产生随机数来模拟 $R(t)$ 和 $G(t)$ 。设 R_1 和 R_2 为服从 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数, 分别代表可靠度 $R(t)$ 和修复概率的相反数 $1 - G(t)$, 则元件的无故障运行时间 TTF 可按式(6)来计算。

$$\int_T^{T+TTF} h(t) dt = -\ln R_1 \quad (6)$$

式中: T 为元件的运行时间; $h(t)$ 为1.1节所述的元件的故障率分布函数。修复时间 TTR 可按式(7)来

计算。

$$TTR = -\frac{1}{\mu} \ln R_2 = -MTTR \times \ln R_2 \quad (7)$$

式中： μ 为元件的修复率； $MTTR$ 为平均故障修复时间。

3.3 蒙特卡洛模拟法流程

蒙特卡洛模拟法需要进行长时间的模拟来减小误差，但文章考虑了元件的生命期限和故障率的变化，所以根据配电网运行的实际情况做出两点假设：1) 系统中所有元件都是有生命期限的，其值为元件故障率参数中的 T_3 ，元件的运行时间达到 T_3 时，将用新的元件对其进行替换，忽略替换过程产生的影响；2) 元件每次故障被修复后，等同于新的元件，其运行时间归零。

根据以上分析，用 T 表示系统模拟时钟， t_i 表示元件 i 运行时间，对于一个具有 m 个元件的配电网，用蒙特卡洛法来计算可靠性指标的具体步骤如下。

1) 给定需要模拟的年数，初始化系统模拟时钟 T 为 0，初始化所有元件的运行时间 $t_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为 0。

2) 产生 m 个服从 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数 R_1 ，根据每个元件所在运行时间和元件的故障率分布函数 $h(t)$ 按式(6)求元件的无故障运行时间 $TTF_i (i=1, 2, \dots, m)$ 。

3) 找出最小的 TTF_i ，对应于第 i 个元件最先发生故障。对其产生一个新的服从 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数 R_2 ，根据式(7)求其修复时间 TTR 。

4) 根据 2.3 节建立的 FMEA 表，统计第 i 个元件发生故障时所有负荷点的停电次数、停电时间、缺少供电量等信息。其中，A 类和 B2 类区域停电时间为 TTR ；B1 类区域的停电时间为故障隔离时间与负荷转代时间；C 类区域的停电时间为故障隔离时间；D 类区域故障时间为 0。

5) 初始化元件 i 的运行时间 t_i 为 0，系统模拟时钟向前走 $TTF_i + TTR$ 。

6) 判断元件运行时间 $t_i (i=1, 2, \dots, m)$ 有没有超过元件生命周期 T_3 的，如果有则将其归零。

7) 判断是否达到指定的模拟年数。如果达到，计算各负荷点的可靠性指标和系统的可靠性指标。如果没有，返回步骤 2) 继续进行模拟。

4 算例及分析

以 IEEE RBTS BUS6 系统为基础^[19]，对其进行改造，改造后的系统结构图如图 7 所示。系统中包

括一条 10 kV 母线和四条馈线出线，共有馈线 64 条、配电变压器 38 台、负荷点 40 个。考虑馈线段、配电变压器的故障，同时也考虑开关元件(断路器、隔离开关、熔断器)的故障。假定故障隔离时间为 1 h，故障隔离与负荷转代时间也为 1 h，所有元件的平均修复时间 $MTTR$ 均为 5 h。

根据 1.1 节所述的配电网元件故障率分布函数，各元件故障率分布参数如表 3 所示。馈线长度和负荷点参数见文献[19]。

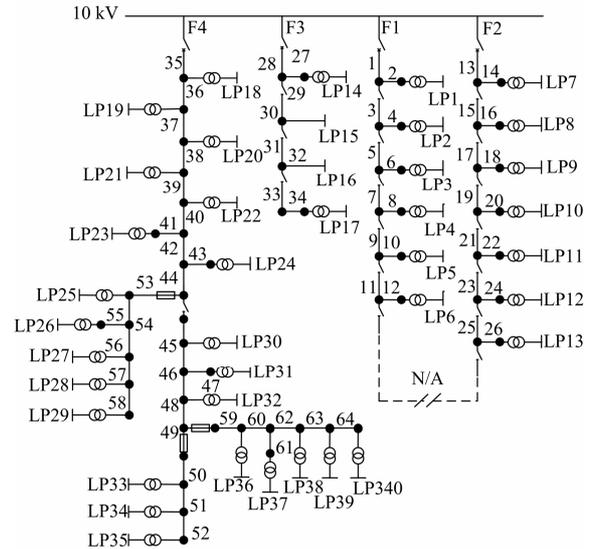


图 7 改造后的 IEEE RBTS BUS6 系统接线图

Fig. 7 Configuration of the IEEE RBTS BUS6 after modifying

表 3 元件故障率分布参数

Table 3 Element failure rate data

元件	T_1	T_2	T_3	β_1	β_2	β_3	K
馈线	10	15	30	-0.02	0	0.08	0.06
配电变压器	2	15	30	-0.2	0	0.17	0.02
断路器	1	10	20	-0.3	0	0.15	0.06
隔离开关	1	10	20	-0.3	0	0.15	0.06
熔断器	0	5	10	0	0	0.2	0.06

注：时间 T 的单位均为年；对于馈线， K 的单位为次/年·km。

通过对系统进行 10 000 年的模拟，求得负荷点可靠性指标与文献[18]所求的可靠性指标对比如表 4 所示(限于篇幅，只列出部分负荷点可靠性指标)，系统可靠性指标与文献[18]结果对比如表 5 所示。此外，本文与文献[18]所用算例在拓扑结构、馈线长度、负荷大小、故障隔离时间等方面完全相同，不同的是文献[18]所有元件的故障率为定值(见表 6)。

从表 4 中可以看出，对于辐射状配电网，与主电源距离越远的负荷点供电可靠性越差，备用电源的引入可以缩短每次停电的时间。对比本文所求负

荷点可靠性指标与文献[18]的结果可以发现, 本文求出的年平均停电次数较高, 导致年平均停电时间偏高。这主要是由于本文考虑了元件故障率的变化, 元件老化导致元件故障率升高, 所以平均每年发生故障次数增多。由表 5 可以看出本文所求系统可靠性指标与文献[18]结果也存在一定的差异, 一方面由于本文考虑了元件故障率的变化, 另一方面文献[18]假设所有负荷点用户数均为 1, 而本文所用的数据更接近实际。综上所述, 可以认为本文提出的方法更反映配电网实际运行的情况, 所求的可靠性指标更为合理。

表 4 部分负荷点可靠性指标
Table 4 Reliability indices of some load points

负荷点	本文结果		文献[18]结果	
	λ /(次/年)	U /(h/年)	λ /(次/年)	U /(h/年)
LP1	1.269 0	2.426 0	0.976 8	1.880 0
LP13	1.484 0	2.305 0	1.157 3	2.106 3
LP14	0.786 0	1.926 0	0.630 9	1.529 6
LP17	0.786 0	3.870 0	0.630 9	3.259 4
LP18	2.738 0	9.339 0	2.209 2	7.459 5
LP25	2.738 0	13.839 0	2.209 2	11.090 8
LP28	3.558 0	19.903 0	2.802 6	14.207 7
LP31	4.039 0	15.756 0	3.178 8	12.343 9
LP36	4.015 0	20.175 9	3.164 5	16.072 2

表 5 系统可靠性指标
Table 5 Reliability index of the system

系统可靠性指标	SAIFI/ (次/用户·年)	SAIDI/ (h/用户·年)	ENS/ MW	ASAI
本文结果	2.110 3	6.881 7	87.042 0	0.999 2
文献[18]结果	1.967 5	7.707 2	120.942 0	0.999 1

表 6 文献[18]所用算例元件故障率
Table 6 Element failure rate data in reference [18]

元件	故障率/(次/年)
馈线	0.065
配电变压器	0.013
断路器	0.06
隔离开关	0.06
熔断器	0.06

5 结论

本文用一种改造威布尔分布来拟合配电网元件故障率随时间变化情况, 提出馈线区、元件、负荷三类数据结构用来表示配电网拓扑结构及元件和负荷点的参数。采用蒙特卡罗模拟法与 FMEA 相结合的配电网可靠性评估方法, 考虑了元件故障率随时

间的变化。该方法思路清晰, 步骤明确, 适用于计算复杂配电网可靠性指标的情况, 比以往文献中认为故障率为常数的方法更贴近实际情况。以改造的 IEEE RBTS BUS6 系统为算例, 计算结果合理, 验证了该算法的有效性。

参考文献

- [1] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 172-178.
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on regional accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 172-178.
- [2] 徐玉琴, 吴颖超. 考虑风力发电影响的配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 154-158.
XU Yuqin, WU Yingchao. Reliability evaluation for distribution system connected with wind-turbine generators[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 154-158.
- [3] 王秀丽, 罗沙, 谢绍宇, 等. 基于最小割集的含环网配电网系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 39(9): 52-58.
WANG Xiuli, LUO Sha, XIE Shaoyu, et al. Reliability evaluation of distribution systems with meshed network based on the minimum-cut set[J]. Power System Protection and Control, 2009, 39(9): 52-58.
- [4] 徐荆州, 李扬. 基于 GO 法的复杂配电系统可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2007, 21(1): 149-153.
XU Jingzhou, LI Yang. Reliability assessment of complex distribution system using GO method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 21(1): 149-153.
- [5] 龚剑波, 黄民翔, 孙飞飞. 基于 GO 法的含分布式电源的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 90-94.
GONG Jianbo, HUANG Minxiang, SUN Feifei. Reliability assessment based on GO methodology for the distribution system including distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 90-94.
- [6] 钟宇峰, 黄民翔, 羌丁建. 电池储能系统可靠性建模及其对配电系统可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 95-102.
ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, QIANG Dingjian. Reliability modeling of battery energy storage system and its effect on the reliability of distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 95-102.

- [7] BILLINTON R, WANG Peng. Teaching distribution system reliability evaluation using Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 397-403.
- [8] 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.
DING Ming, ZHANG Jing, LI Shenghu. A sequential Monte-Carlo simulation based reliability evaluation model for distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 38-42.
- [9] 万国成, 任震, 吴日昇, 等. 混合法在复杂配电网可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 96-102.
WAN Guocheng, REN Zhen, WU Risheng, et al. Hybrid method for the reliability evaluation of the complex distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 96-102.
- [10] 梁惠施, 程林, 刘思革. 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 76-81.
LIANG Huishi, CHENG Lin, LIU Sige. Monte Carlo simulation based reliability evaluation of distribution system containing microgrids[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 76-81.
- [11] 郭思琪, 袁越, 傅质馨, 等. 计及负荷分级的并网型微网供电可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 47-53.
GUO Siqi, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability analysis of grid-connected microgrid power supply considering load classification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 47-53.
- [12] 赵渊, 周家启, 刘志宏. 大电网可靠性的序贯和非序贯蒙特卡罗仿真的收敛性分析及比较[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 127-133.
ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, LIU Zhihong. Convergence analysis and comparison of sequential and nonsequential Monte-Carlo simulation for bulk power system reliability assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 127-133.
- [13] 杨蔚百, 戴景宸, 孙启宏. 电力系统可靠性分析基础及应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 1986.
- [14] 孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆. 基于 Marquardt 法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 85-90.
SUN Peng, CHEN Shaohui, ZHANG Caiqing. Assessment of failure rate for substation equipment life cycle based on Marquardt parameter estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 85-90.
- [15] 苏傲雪, 范明天, 张祖平, 等. 配电系统元件故障率的估算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 61-66.
SU Aoxue, FAN Mingtian, ZHANG Zuping, et al. A new approach for the evaluation of failure rates on distribution system components[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 61-66.
- [16] 谢莹华, 王成山. 基于馈线分区的中压配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 35-39.
XIE Yinghua, WANG Chengshan. Reliability evaluation of medium voltage distribution system based on feeder partition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 35-39.
- [17] ATWA Y M, EI-SAADANY E F, GUISE A C. Supply adequacy assessment of distribution system including wind-based DG during different modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 78-86.
- [18] 王浩鸣. 含分布式电源的配电系统可靠性评估方法[D]. 天津: 天津大学, 2012.
WANG Haoming. Reliability evaluation of distribution system including distributed generations[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [19] BILLINTON R, JOHNNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.

收稿日期: 2014-08-26

作者简介:

赵洪山(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统混杂建模、动态分析与控制以及电力系统优化计算等;
E-mail: zhaohscn@126.com

赵航宇(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电系统可靠性。E-mail: zhy535266357@163.com

(编辑 张爱琴)