

基于故障树蒙特卡洛模拟法的孤岛微电网薄弱环节识别

陆 丹^{1,2}, 袁 越^{1,2}

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 为增强微电网风险评估工作的针对性,采用故障树蒙特卡洛模拟法对孤岛微电网的薄弱环节进行识别。以网内不同用户供电中断为顶事件建立各用户的故障树模型,通过蒙特卡洛模拟法随机抽样建立孤岛微电网的两状态模型。从元件重要度和网络风险重要度 2 个方面,建立微电网薄弱环节重要度指标体系。对某典型低压孤岛微电网的薄弱环节进行识别,评估孤岛微电网的可靠运行能力,算例结果验证了所提方法的合理性。结果表明,柴油机和逆变器是该算例微电网的薄弱环节,降低其故障率有利于降低微电网的风险水平。

关键词: 孤岛微电网; 故障树蒙特卡洛模拟法; 薄弱环节识别; 重要度; 风险

中图分类号: TM 61

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.006

0 引言

微电网凭借其自治运行、独立组网等特点,在一些偏远的山区或海岛等大电网不能普及的地区得到了实际应用,解决了居民用电问题,实现了孤岛运行^[1-2]。然而,微电网孤岛运行时与大电网脱离,且网内存在许多具有间歇性和波动性的分布式电源,导致网内用户的长期稳定供电具有一定的风险。孤岛微电网含有多个元件,任意元件的随机故障都会影响系统的风险水平。因此,通过对比各元件故障对孤岛微电网运行风险的贡献程度,辨识微电网系统的薄弱环节,有针对性地对微电网的薄弱环节进行故障诊断,既能提高检修的效率,又能降低孤岛微电网运行风险水平,具有十分重要的研究意义。

目前,已有大量文献对于传统电网系统薄弱环节识别进行了研究。文献[3]基于效用理论提出一套电网综合风险评估体系,通过风险指标的计算辨识电网运行的薄弱环节。文献[4-5]采用可靠性跟踪方法得到各元件对系统可靠性指标的贡献度,辨识系统的薄弱环节,并提出针对性的电网改善方案。文献[6]将故障树分析法与潮流模型相结合,以 IEEE RTS-79 为例,计算了系统负荷功率传输故障概率,比较了系统内各元件对系统稳定运行的重要程度。此外,针对非计划离网运行的微电网,文献[7]采用故障树分析法,文献[8-9]采用故障树图法结合蒙特卡洛模拟法,以各元件故障率为基础评估微电网离网一周内的可靠运行能力,计算各元件对其可靠运行的影响程度,辨识其薄弱环节。然而目前针对长

期孤岛运行微电网系统薄弱环节的研究还较少。传统电网包含元件众多,其电源结构和运行方式与微电网存在很大差异,大电网的薄弱环节识别采用的方法以及所得结论并不完全适用于微电网。孤岛微电网与非计划离网运行的微电网的运行方式不同,两者的薄弱环节存在差异。非计划离网运行的微电网通过对短时间内的薄弱环节进行识别,缺乏对微电网长期稳定运行能力的宏观认识。因此,本文以孤岛微电网为研究对象,对其薄弱环节进行识别。

对微电网系统薄弱环节进行识别是风险评估工作的重要组成部分,能够从微观的角度提高微电网风险评估的针对性。风险评估常用算法包括解析法和模拟法。微电网内含有大量具有随机性的可再生能源,无法采用解析法^[10]列出所有的故障状态。故障树蒙特卡洛模拟 FTMCS (Fault Tree Monte Carlo Simulation) 法可以清晰地反映各元件故障之间的逻辑关系,并通过抽样模拟统计系统的运行规律,适用于规模不太大但计算繁琐的系统^[10-11]。因此,本文采用 FTMCS 法来辨识孤岛微电网系统的薄弱环节。首先建立用户故障树模型求出微电网用户供电中断与各个微电网元件故障之间的逻辑关系,然后运用蒙特卡洛模拟 MCS (Monte Carlo Simulation) 法随机抽样模拟各元件的故障情况,根据故障树模型得到微电网系统及其元件的运行状态,最后通过计算最小割集重要度 MCSI (Minimal Cut Set Importance)、基本元件重要度 CI (Component Importance) 以及网络风险重要度指标,量化各元件故障对各用户以及整个微电网运行失效的贡献度,确定系统的薄弱环节,并为降低微电网系统的风险水平提出了建议。

1 孤岛微电网两状态模型

1.1 微电网故障树模型

本文针对孤岛运行的微电网进行薄弱环节识

收稿日期:2016-05-21;修回日期:2017-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477041);教育部、国家外国专家局海外名师项目(MS2012HHD021)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477041) and Ministry of Education/State Administration of Foreign Experts Affairs:Program of Distinguished International Experts(MS2012HHD021)

别,造成微电网用户供电中断的原因有很多,具体包括网内元件发生故障、可控电源的发电容量不足以及不可控电源的出力波动性等。本文重点研究微电网用户供电中断与各元件故障之间的逻辑关系,暂不考虑后两者造成的影响。以由元件故障造成的用户供电中断(下文简称为用户供电中断)为顶事件建立其故障树模型,是进行薄弱环节识别的基础步骤。

故障树模型是一种基于研究对象结构和功能的工具模型,是一种定性的因果模型^[12-13]。以微电网系统中最不希望发生的事件,即用户供电中断为顶事件,找出引起顶事件发生的直接原因即中间事件,如此层层追溯跟踪,直到找到无法再分解的基本原因,即底事件。采用相应的逻辑符号将各层事件连接起来,形成一个倒立树状图,称为故障树。图 1 即为一个简单的故障树模型,其中 GD 为顶事件, $S_b \sim S_e$ 为中间事件, $X_1 \sim X_6$ 为底事件, a, b 和 e 为与门, c 和 d 为或门。

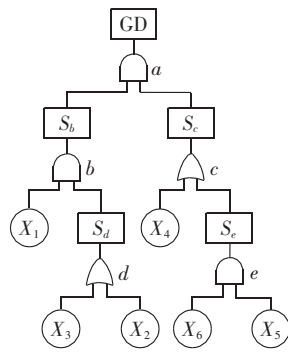


图 1 简单的故障树模型
Fig.1 A simple fault-tree model

为了对故障树进行定性和定量的分析,采用最小割集^[14]描述故障树。最小割集是指能使顶事件发生的最少底事件组成的割集,可由下式表示:

$$A_{MCSj} = \bigcap_{X_i \in A_{MCSj}} X_i \quad (1)$$

其中, A_{MCSj} 为第 j 个最小割集; X_i 为构成第 j 个最小割集的单个底事件。

最小割集中的所有底事件都发生时,该最小割集才发生;而任意一个最小割集发生都会引起顶事件的发生。因此在找出故障树中所有最小割集后,其顶事件可由下式表示:

$$GD = \bigcup_{j=1}^{N_{MCS}} A_{MCSj} = \bigcup_{j=1}^{N_{MCS}} \bigcap_{X_i \in A_{MCSj}} X_i \quad (2)$$

其中, N_{MCS} 为故障树中最小割集的个数。

1.2 基于 FTMCS 法的孤岛微电网两状态模型

获得微电网的故障树模型后,需要进行相关的参数计算以寻得微电网系统的薄弱环节。对于复杂的微电网系统而言,故障树模型结构冗杂,若仅依靠模型结构求解系统薄弱环节,计算量较大。而利用实际微电网进行试验寻找其薄弱环节耗时长、费用高,单次试验的结果准确性较低,多次试验基本上是不行性的。FTMCS 法通过抽样模拟系统的运行状态进而统计其运行规律,适用于所有计算繁琐的电力系统。故本文采用 FTMCS 法进行多次模拟,得到稳定的统计数据,从而锁定微电网系统中最薄弱的环节。

采用 FTMCS 法辨识微电网系统的薄弱环节首先需要根据元件的故障率随机抽样得到元件的故障触发时间,而后结合微电网的故障树模型得到系统的故障触发时间以及系统的运行状态^[15]。经过多次重复试验累计足够多的样本,再采用概率统计的方法求解系统的重要度指标确定其薄弱环节。为了简化问题,假设微电网内各个元件以及微电网系统只有正常运行和故障 2 种状态,且假设各个元件相互独立。

通常认为微电网各个元件的故障率满足指数分布^[16],首先对每个元件进行随机抽样,具体公式如下:

$$F(t_{b_i}) = 1 - e^{-\lambda_i t_{b_i}} = \xi \quad (3)$$

$$t_{b_i} = F^{-1}(\xi) = -\ln(1 - \xi) / \lambda_i \quad (4)$$

其中, $F(t_{b_i})$ 为第 i 个底事件的故障概率分布函数; t_{b_i} 为第 i 个底事件的故障触发时间; λ_i 为第 i 个底事件的故障率; ξ 为在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数。

设置 $\phi_k[X(t)]$ 为以第 k 个用户供电中断为顶事件的故障树结构函数, $X(t)$ 为其状态变量,则 t 时刻故障树模型状态函数为:

$$X(t) = [b_1(t), b_2(t), \dots, b_i(t), \dots, b_n(t)] \quad (5)$$

$$b_i(t) = \begin{cases} 1 & t \geq t_{b_i} \\ 0 & t < t_{b_i} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $b_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 个底事件的运行状态。在故障触发时间 t_{b_i} 之前,底事件 b_i 处于运行状态;在故障触发时间 t_{b_i} 之后, b_i 处于故障状态。

因此,顶事件的运行状态和第 j 个最小割集的运行状态公式如下:

$$\phi_k(t) = \phi_k[X(t)] = \begin{cases} 1 & t \geq t_{GDk} \\ 0 & t < t_{GDk} \end{cases} \quad (7)$$

$$\varphi_j(t) = \begin{cases} 1 & t \geq t_{MCSj} \\ 0 & t < t_{MCSj} \end{cases} \quad (8)$$

$$t_{GDk} = \min(t_{MCS1}, t_{MCS2}, \dots, t_{MCSN_{MCS}}) \quad (9)$$

$$t_{MCSj} = \max(t_{b_1}, t_{b_2}, \dots, t_{b_i}, \dots, t_{b_n}) \quad (10)$$

其中, $\phi_k(t)$ 为 t 时刻第 k 个顶事件的运行状态; $\varphi_j(t)$ 为 t 时刻第 j 个最小割集的运行状态; t_{GDk} 为第 k 个顶事件的故障触发时间; t_{MCSj} 为第 j 个最小割集故障触发时间。

设定微电网模拟运行总时间为 $T_{\max}$, 当 $t_{GDk} \leq T_{\max}$ 时认为在模拟总时间内顶事件发生, 当 $t_{GDk} > T_{\max}$ 时则认为顶事件不发生。为了得到模拟时间内各项事件的故障概率分布, 即顶事件的不可靠度^[19], 将微电网模拟运行总时间进行 N 段等分, 通过 W 次重复抽样, 统计第 k 个顶事件触发时间落在各个时段内的概率。具体公式如下:

$$\Delta T = T_{\max} / N \quad (11)$$

$$p_k(n) = w_{n,k} / \sum_{m=1}^N w_{m,k} \quad (12)$$

$$P_k(n) = \sum_{m=1}^n p_k(m) \quad (13)$$

其中, ΔT 为模拟总时间 N 段等分后的每段时长; $p_k(n)$ 为 W 次抽样中第 k 个顶事件的触发时间 $t_{\text{GD}k}$ 落在采样时间段 $[(n-1)\Delta T, n\Delta T]$ 内的概率; $P_k(n)$ 为 W 次抽样中第 k 个顶事件在前 $n\Delta T$ 时间内的发生概率; $w_{n,k}$ 为 W 次抽样中 $t_{\text{GD}k}$ 落在采样时间段 $[(n-1)\Delta T, n\Delta T]$ 内的次数。

微电网内任意一个用户供电中断, 即视为微电网系统运行失效, 因此整个微电网系统的不可靠度如下:

$$U_R(n) = \min(P_1(n), P_2(n), \dots, P_{N_L}(n)) \quad (14)$$

其中, $U_R(n)$ 为微电网系统在前 $n\Delta T$ 时间内的不可靠度; N_L 为微电网内的用户数。根据微电网运行不可靠度曲线, 可以较为准确地掌握微电网允许稳定运行的最大年限。

2 微电网薄弱环节重要度分析

2.1 MCSI 与 CI

在微电网的故障树模型中有一系列的基本元件和最小割集。不同的元件和最小割集对于顶事件发生的贡献是不一样的。对于复杂微电网系统的故障树分析, 将有大量的基本元件和最小割集故障情况需要测试, 工作量过大。因此引入 MCSI 和 CI^[7], 从量级上进行分析 and 比较。对重要度数值较大的最小割集和基本元件, 可按照重要度值从大到小排序进行检测, 以提高检测的命中率, 减少工作量。

MCSI 定义为由某一个最小割集故障引起故障树模型中顶事件发生的时间概率; CI 定义为由某个元件故障引起故障树模型中顶事件发生的时间概率。具体公式如下:

$$\text{MCSI}(j) = \frac{Q_{\text{MCS}j}}{Q_{\text{GD}k}} = \frac{\sum_{t=1}^{T_{\max}} \varphi_j(t) / \sum_{t=1}^{T_{\max}} \phi_k(t)}{\quad} \quad (15)$$

$$\text{CI}(i) = \frac{Q_{b_i}}{Q_{\text{GD}k}} = \frac{\sum_{t=1}^{T_{\max}} b_i(t) / \sum_{t=1}^{T_{\max}} \phi_k(t)}{\quad} \quad (16)$$

其中, $\text{MCSI}(j)$ 为第 j 个最小割集的重要度; $\text{CI}(i)$ 为第 i 个底事件的重要度; $Q_{\text{MCS}j}$ 为模拟时间内第 j 个最小割集处于发生状态的时间占比; $Q_{\text{GD}k}$ 为第 k 个顶事件处于发生状态的时间占比; Q_{b_i} 为第 i 个底事件的发生引起第 k 个顶事件发生时该底事件的发生时间占比; b_i 满足 $b_i \in \varphi_j$ 且 $\varphi_j(t) = 1$, 当底事件 b_i 能引起某个最小割集 φ_j 发生时自然能引起顶事件的发生。

2.2 网络风险重要度

MCSI 和 CI 量化了最小割集和底事件对微电网内单个用户供电的影响程度, 而网络风险重要度指标^[7-8]可综合反映基本元件对整个微电网系统故障的影响程度。网络风险重要度指标又可分为网络风险贡献值 NRAW(Network Risk Achievement Worth) 和网络风险降低值 NRRW(Network Risk Reduction Worth)。NRAW 描述了增加该基本元件的不可用度

可以使微电网系统不可用度的增加程度, NRAW 较高的元件, 需要定期进行检查和维护, 以避免元件故障导致微电网系统的运行风险突然增加。NRRW 描述了降低该基本元件的不可用度可以使微电网系统不可用度降低的程度, NRRW 较高意味着增加该元件的可靠运行能力可以显著增加微电网系统的可靠运行能力, 使其运行风险水平保持在一个较低的等级。2 个网络风险重要度指标公式如下:

$$\text{NRAW}(i) = \frac{\sum_{k=1}^{N_L} Q_{\text{GD}k}(Q_{b_i}=1)K_k}{\sum_{k=1}^{N_L} Q_{\text{GD}k}K_k} \quad (17)$$

$$\text{NRRW}(i) = \frac{\sum_{k=1}^{N_L} Q_{\text{GD}k}K_k}{\sum_{k=1}^{N_L} Q_{\text{GD}k}(Q_{b_i}=0)K_k} \quad (18)$$

其中, $\text{NRAW}(i)$ 为第 i 个底事件的网络风险贡献值; $\text{NRRW}(i)$ 为第 i 个底事件的网络风险降低值; $Q_{\text{GD}k}(Q_{b_i}=1)$ 为模拟时间内当第 i 个底事件的故障率设为 1 时, 第 k 个顶事件处于发生状态的时间占比; $Q_{\text{GD}k}(Q_{b_i}=0)$ 为模拟时间内当第 i 个底事件的故障率设为 0 时, 第 k 个顶事件处于发生状态的时间占比; K_k 为第 k 个用户的年负荷峰值。

3 薄弱环节识别的模拟仿真流程

本文采用 FTMCS 法来辨识微电网系统的薄弱环节, 图 2 为具体的模拟仿真流程, 主要包括三部分内容。

a. 建立微电网故障树模型: 分别以微电网内不同的用户供电中断为顶事件构建微电网的故障树模型, 理清顶事件、最小割集与各底事件之间的逻辑关系。

b. 绘制不可靠度曲线: 采用 MCS 随机抽样得到各底事件的故障触发时间并计算顶事件的故障触发时间, 然后判断顶事件故障触发时间所在时间区域, 通过多次模拟记录各时段内顶事件发生次数。根据式(11)~(14)绘制微电网不可靠度曲线。

c. 计算重要度指标: 调整微电网模拟运行总时间 $T_{\max}$ 大小, 采用 MCS 随机抽样得到各底事件的故障触发时间, 根据式(7)~(10)计算顶事件和各最小割集的故障触发时间; 根据式(15)、(16)计算 MCSI 和 CI 值, 判断各元件对每个用户稳定供电的影响能力; 假设某一底事件的故障触发时间为 0 或者 $T_{\max}$, 结合蒙特卡洛抽样得到的其余底事件的故障触发时间, 得到顶事件在此假设下处于发生状态的时间占比, 由式(17)、(18)计算各底事件对整个微电网系统的 NRAW 和 NRRW, 寻找微电网系统的薄弱环节。

为保证模拟精度, 需在大量的模拟仿真基础上(设置为 10^5 次)进行统计分析, 辨识系统薄弱环节。

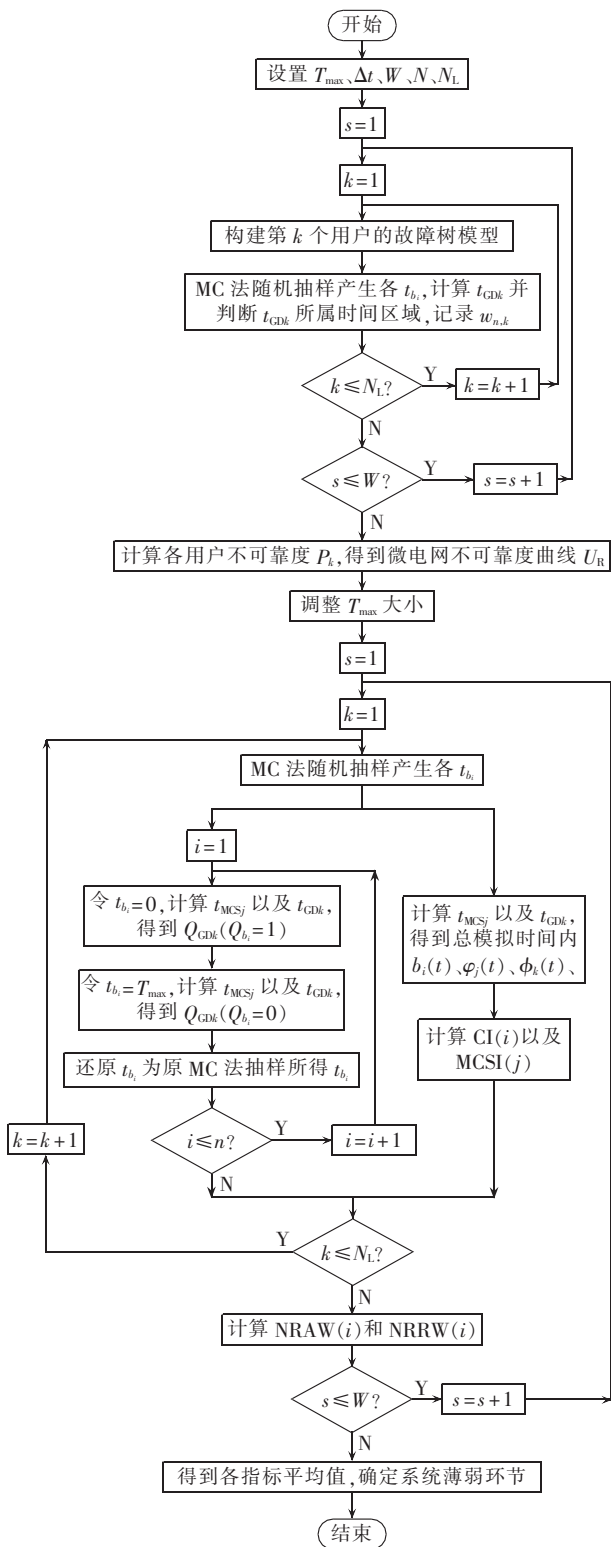


图 2 薄弱环节识别流程图

Fig.2 Flowchart of weak part identification

4 算例分析

本文采用欧洲典型低压风光柴储微电网^[17]为研究算例,进行微电网系统薄弱环节的识别。网络结构如图 3 所示,独立微电网系统内包含 1 个风力发电系统、1 个光伏发电系统、1 个储能设备、3 台柴油

机组以及 5 组负荷用户。其中 5 组用户的年负荷峰值分别为 15、72、50、15、47 kW。

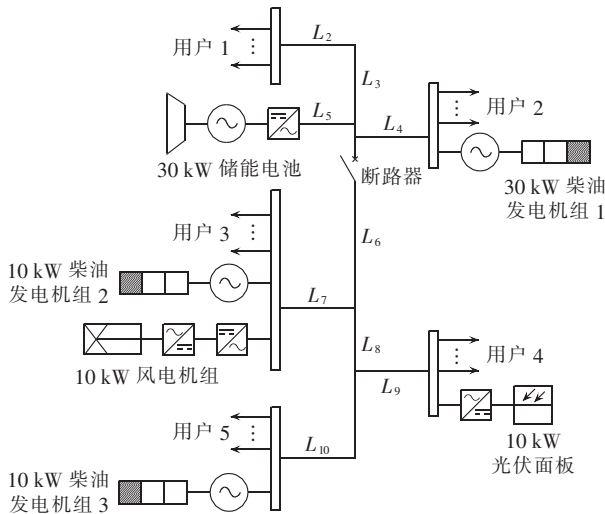


图 3 典型低压微电网

Fig.3 Typical low-voltage microgrid

4.1 微电网故障树模型

针对孤岛微电网的运行特点,本文进行如下假设:忽略极端自然条件对微电网硬件的影响;不计微电网检测系统和控制系统的故障情况;忽略光伏发电中的人为操作故障。以网内的用户 2 为例,故障树模型如图 4 和图 5 所示,图中“△”为转移符号,表明故障树继续分解的部分可由此符号转移到子故障树中去。故障树模型中所含的各底事件及其故障率参照表 1,故障率参考自文献[9,15,18]。

4.2 微电网薄弱环节识别结果与分析

本文采用 FTMCS 法根据表 1 中各底事件的故障率随机抽样得到各底事件的故障触发时间,进一步计算各项事件的故障触发时间,经过多次模拟,得到微电网系统的不可靠度曲线,结果如图 6 所示。

图 6(a)—(c)分别显示了模拟 10 次、10³ 次和 10⁵ 次时,微电网系统供电不可靠度随时间的变化趋势。从图中可以看出,模拟 10 次得到的不可靠度曲线波折明显,模拟 10³ 次得到的不可靠度曲线仍不够平滑,而模拟 10⁵ 次得到的不可靠度曲线平滑上升,因此,经过 10⁵ 次模拟后总结出的期望值可以体现微电网运行的一般规律。进一步分析图 6(c)可以看出,随着运行时间的增长,微电网系统的不可靠度增加,最终达到饱和。在 $t=5.4 \times 10^4$ h 时,供电不可靠度为 50%,即在前 5.4×10^4 h 内,该微电网系统发生故障的概率为 50%;在 $t=2 \times 10^5$ h 时,供电不可靠度为 100%,即在运行 2×10^5 h 内,该微电网必定发生供电中断。该微电网的可靠运行年限约为 22.8 a。

微电网在模拟运行 2×10^5 h 内必定会因网内元件故障造成用户供电中断,因此调整微电网模拟运行

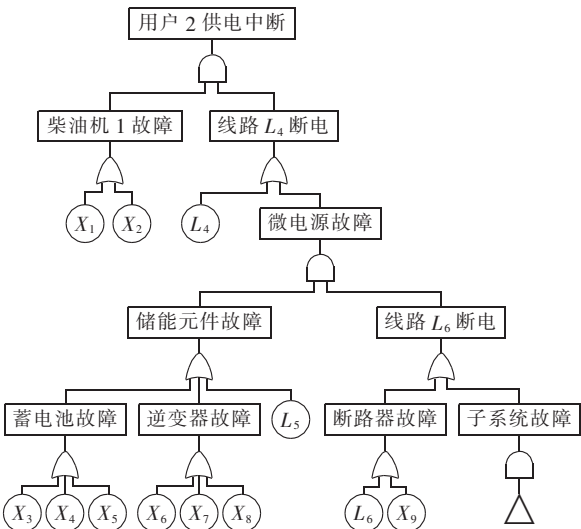


图 4 用户 2 的故障树模型
Fig. 4 Fault-tree model of user-2

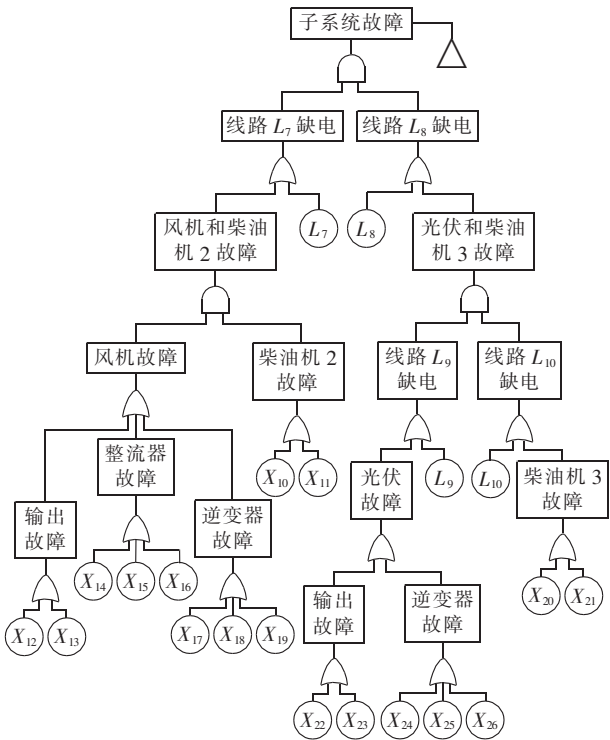


图 5 用户 2 的子系统故障树模型
Fig.5 Fault-tree model of subsystem of user-2

总时间 $T_{\max}$ 为 2×10^5 h。根据 MCS 抽样生成的各底事件故障时间,模拟每个顶事件及其最小割集的运行状态,结合式(15)、(16)计算总时间内的 MCSI 和 CI,辨识微电网内每个用户的薄弱环节。表 2 中列出了对用户 2 和用户 5 稳定供电最具影响力的最小割集、基本元件及其重要度值。

表 2 中,对用户 2 和用户 5 稳定供电最重要的最小割集由柴油机和逆变器组成,重要度均达到 90% 以上。对 2 组用户最具影响力的前 3 名最小割集相同,均由故障率较高的底事件组成;而后的最小割集

表 1 微电网元件故障率
Table 1 Component failure rates of microgrid

故障名称		编号		$\lambda / (\text{次} \cdot \text{h}^{-1})$
柴油机 1 故障	运行故障	X_1	A	4.5×10^{-5}
	操作故障	X_2		3.4×10^{-5}
储能元件输出故障	蓄电池输出中断	X_3	B	3.0×10^{-7}
	蓄电池短路	X_4		5.0×10^{-7}
	蓄电池输出衰减	X_5		1.0×10^{-7}
	逆变器输出中断	X_6	C	5.0×10^{-6}
	逆变器短路	X_7		2.0×10^{-5}
	逆变器输出衰减	X_8		2.0×10^{-6}
断路器故障	—	X_9		2.0×10^{-6}
柴油机 2 故障	运行故障	X_{10}	H	4.5×10^{-5}
	操作故障	X_{11}		3.4×10^{-5}
风机故障	运行故障	X_{12}	E	1.5×10^{-6}
	操作故障	X_{13}		1.2×10^{-5}
	整流器断路	X_{14}		1.0×10^{-7}
	整流器短路	X_{15}	F	4.0×10^{-6}
	整流器过载	X_{16}		1.0×10^{-7}
	逆变器输出中断	X_{17}		5.0×10^{-6}
柴油机 3 故障	运行故障	X_{20}	K	4.5×10^{-5}
	操作故障	X_{21}		3.4×10^{-5}
	运行故障	X_{22}	I	1.5×10^{-7}
光伏故障	操作故障	X_{23}		—
	逆变器输出中断	X_{24}		5.0×10^{-6}
	逆变器短路	X_{25}	J	2.0×10^{-5}
线路故障	逆变器输出衰减	X_{26}		2.0×10^{-6}
	—	L_2-L_{10}		1.0×10^{-7}

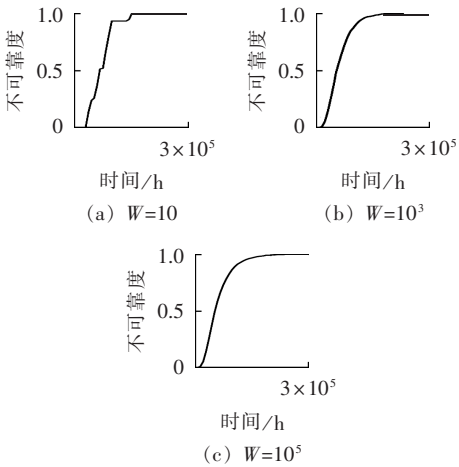


图 6 微电网系统不可靠度曲线
Fig.6 Unreliability curves of microgrid

中由于存在故障率较低的底事件,且不同用户故障树模型不同,故最小割集及其重要度出现分歧。

进一步分析表 2 可得,对于不同的用户,各底事件的重要度是不同的。对用户 2 和用户 5 最重要的底事件分别为底事件 A 和 K,均为柴油机故障,可见柴油机的稳定运行对用户稳定供电十分重要。底事件 A 对于用户 2 的重要度达到 100%,表明用户 2 供电中断时,底事件 A 必定发生了故障,反之不然。底事件 K 对于用户 5 的影响与之类似。

表 2 用户 2 和用户 5 的 MCSI 及 CI
Table 2 MCSIs and CIs of user-2 and user-5

序号	用户 2				用户 5			
	最小割集	MCSI/%	元件	CI/%	最小割集	MCSI/%	元件	CI/%
1	ACGHJK	92.61	A	100.00	ACGHJK	93.10	K	100.00
2	ACEHJK	77.19	C	99.26	ACEHJK	77.60	H	99.76
3	ACFHJK	38.99	H	98.17	ACFHJK	39.20	J	99.71
4	ACX ₉	23.00	K	98.13	GHJKX ₉	21.86	A	98.65
5	ABGHJK	10.31	J	97.99	EHJKX ₉	18.71	C	98.10
6	ABEHJK	8.83	G	93.28	ABGHJK	10.37	G	94.71
7	ABFHJK	4.73	E	77.71	ABEHJK	9.63	E	78.82
8	ABX ₉	2.76	F	39.23	FHJKX ₉	8.87	F	39.74
9	ACGHIK	1.77	X ₉	23.13	ABFHJK	4.75	X ₉	22.75
10	ACEHIK	1.55	B	10.87	ACGHIK	1.78	B	10.80
11	AL ₄	1.42	I	1.86	ACEHIK	1.56	I	1.89
12	ACL ₆	1.28	L ₄	1.42	JKL ₈	1.30	L ₁₀	1.31
13	ACGHL ₉	1.25	L ₆	1.30	KL ₁₀	1.28	L ₈	1.30

用户 1、3 和 4 的 MCSI 和 CI 结果与表 2 类似,此处不再赘述。

考虑微电网内各用户的负荷权重,调整某一底事件的故障触发时间为 0 或 $T_{\max}$,结合蒙特卡洛抽样得到的其余底事件的故障触发时间,由式(17)、(18)可进一步计算出各元件对整个微电网系统稳定运行的影响。表 3 中给出了各元件的 NRAW 和 NRRW。

表 3 微电网元件的 NRAW 和 NRRW
Table 3 NRAWs and NRRWs of microgrid components

元件	NRAW	NRRW	元件	NRAW	NRRW
A	1.0051	6.7544	X ₉	1.1063	1.0126
B	1.0782	1.0047	L ₂	1.0313	1.0001
C	1.0782	3.9819	L ₃	1.0313	1.0001
E	1.0252	1.0308	L ₄	1.1227	1.0006
F	1.0252	1.0062	L ₅	1.0782	1.0004
G	1.0252	1.1413	L ₆	1.1063	1.0006
H	1.0049	7.9554	L ₇	1.0814	1.0005
I	1.0852	1.0010	L ₈	1.1053	1.0006
J	1.0852	6.5891	L ₉	1.0905	1.0005
K	1.0049	7.7128	L ₁₀	1.0831	1.0004

从表 3 中可以看出,每个底事件的 NRAW 和 NRRW 没有明显的相关性,NRAW 低并不意味着 NRRW 一定高。该微电网中 NRAW 较高的事件分别为 L_4 、 X_9 、 L_6 。该断路器与 2 条线路从地理位置上看均处于微电网的中心地区,影响着网内的功率传输,需要定期检修,以免元件的故障导致系统运行的突然失效。NRRW 较高的事件为 H 、 K 、 A ,即网内的 3 组柴油机故障。柴油机的输出波动较小,但运行时间较长时故障概率较大,增加柴油机的稳定运行能力可以有效增加整个微电网系统的稳定运行能力,降低微电网系统的风险水平。

综合以上结论,本文选取网内部分元件,降低其故障率,重新计算微电网系统的不可靠度,结果如图 7 所示。从图中可以看出,降低重要元件的故障率可

以有效增长微电网的有效运行时间,降低网内风险水平。若将网内柴油机的故障率降低至原来的 1/10,则微电网的有效运行时间由原来的 2×10^5 h 增至 5×10^5 h;若将网内风机逆变器的故障率降低至原来的 1/10,则微电网的有效运行时间由原来的 2×10^5 h 增至 2.9×10^5 h。而降低其余 NRRW 指标值较低的元件故障率对微电网系统有效运行时间影响较小。因此,如何降低网内重要元件的故障率,将是今后薄弱环节识别及风险评估的重点方向之一。

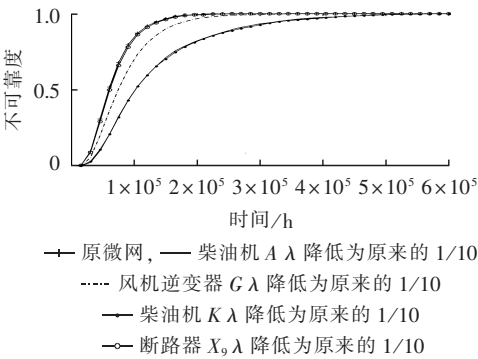


图 7 降低部分元件故障率后微电网系统不可靠度曲线
Fig.7 Improvement of microgrid unreliability curve by lowering component failure rate

5 结论

本文采用 FTMCS 法对孤岛微电网薄弱环节进行识别,建立微电网的故障树模型并采用 MCS 法模拟微电网运行状态,最后通过重要度指标的计算和比较确定微电网系统的薄弱环节。研究结果表明 FTMCS 法可以有效模拟微电网运行状态,精确查找系统的薄弱环节,评估系统的有效运行年限。研究具体措施降低微电网元件故障率,将是下一步的研究重点。

参考文献:

[1] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设

- 备,2011,31(4):120-123.
- WANG Shaoyong. Design and operation of microgrid based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(4):120-123.
- [2] 丁道齐. 复杂大电网安全性分析——智能电网的概念和实现[M]. 北京:中国电力出版社,2010:397-401.
- [3] 巫伟南,杨军,胡文平,等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):129-134.
- WU Weinan,YANG Jun,HU Wenping,et al. Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):129-134.
- [4] 郑颖,谢开贵,李洪兵,等. 基于可靠性跟踪的薄弱环节辨识方法在省级电网可靠性改善中的应用研究[J]. 电测与仪表,2015,52(6):118-123.
- ZHENG Ying,XIE Kaigui,LI Hongbing,et al. Application of the weak part identification based on reliability tracking method to reliability improvement of provincial power network[J]. Electrical Measurement and Instrumentation,2015,52(6):118-123.
- [5] 纪静,谢开贵,曹侃,等. 广东电网薄弱环节辨识及可靠性改善分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):98-102.
- JI Jing,XIE Kaigui,CAO Kan,et al. Weak part identification and reliability improvement analysis of Guangdong Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(13):98-102.
- [6] VOLKANOVSKI A, ČEPIN M,MAVKO B. Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety,2009,94(6):1116-1127.
- [7] LI Z J,YUAN Y,LI F R. Evaluating the reliability of islanded microgrid in an emergency mode[C]//Universities Power Engineering Conference(UPEC). [S.l.]:IEEE,2010:1-5.
- [8] SONG G,CHEN H,GUO B. A layered fault tree model for reliability evaluation of smart grids[J]. Energies,2014,7(8):4835-4857.
- [9] 解翔,袁越,邹文仲,等. 非计划孤岛下的微电网供电可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):18-23.
- XIE Xiang,YUAN Yue,ZOU Wenzhong,et al. Reliability evaluation of microgrid power supply in emergency non-scheduled isolated mode[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(9):18-23.
- [10] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京:科学出版社,2008:79-91.
- [11] 别朝红,王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自动化,1997,21(6):68-75.
- BIE Zhaohong,WANG Xifan. Application of Monte Carlo simulation in power system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(6):68-75.
- [12] 赵振宇,刘伊生. 故障树法引入工程项目风险管理研究[J]. 现代电力,2002,19(2):95-99.
- ZHAO Zhenyu,LIU Yisheng. Application of fault tree analyzing method to risk management of a construction project[J]. Modern Electric Power,2002,19(2):95-99.
- [13] 乐继洲. 故障树原理和应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1989:11-49.
- [14] GARRIBBA S,MUSSIO P,NALDI F,et al. Efficient construction of minimal cut sets from fault trees[J]. IEEE Transactions on Reliability,1977,26(2):88-94.
- [15] SHI X,BAZZI A M. Fault tree reliability analysis of a micro-grid using Monte Carlo simulations[C]//Power and Energy Conference at Illinois(PECI). [S.l.]:IEEE,2015:1-5.
- [16] ZHANG P,CHAN K W. Reliability evaluation of phasor measurement unit using Monte Carlo dynamic fault tree method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1235-1243.
- [17] PAPATHANASSIOU S,HATZIARGYRIOU N,KAI S. A benchmark low voltage microgrid network[C]//Proceedings of CIGRE Symposium:Power Systems with Dispersed Generation. Athens, Greece:[s.n.],2005:1-8.
- [18] MOHD K R,SLOBODAN J. Reliability modelling of uninterruptible power supply systems using fault tree analysis method[J]. European Transactions on Electrical Power,2009,19(2):814-826.
- [19] 刘长泰. 设备故障管理的重要工具——不可靠度曲线和即时故障率曲线[J]. 设备管理,1986,2(4):17-20.
- LIU Changtai. An important tool of equipment failure management-unreliability curve and instant failure rate curve[J]. Equipment Management,1986,2(4):17-20.

作者简介:



陆丹

陆丹(1992—),女,江苏张家港人,硕士研究生,研究方向为孤岛微电网风险评估(E-mail:ludan_hhu@163.com);

袁越(1966—),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统运行与控制、可再生能源发电系统、智能电网与微电网技术(E-mail:yyuan@hhu.edu.cn)。

Weak part identification based on fault-tree Monte Carlo simulation for islanded microgrid

LU Dan^{1,2},YUAN Yue^{1,2}

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China;

2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University,Nanjing 210098,China)

Abstract: FTMCS(Fault Tree Monte Carlo Simulation) method is applied to identify the weak parts of islanded microgrid for improving its risk assessment. A user fault-tree model with the power outage as its top event is built for different users. MCS(Monte Carlo Simulation) method is applied to establish the two-state model of islanded microgrid. An importance index system based on component importance and network risk importance is built for the weak parts of microgrid. The weak parts of a typical low-voltage islanded microgrid are identified and its ability of reliable operation is assessed,which verifies the rationality of the proposed method. Results show that,since diesel engines and inverters are weak parts of the case microgrid,its risk level can be decreased by lowering their failure rates.

Key words: islanded microgrid; fault-tree Monte Carlo simulation method; weak part identification; importance; risks