

考虑微电网非计划解列运行的配电网可靠性评估

王 枫¹, 祁彦鹏², 傅正财¹

(1. 上海交通大学 电气工程系 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200030;

2. 国网天津经研院, 天津 300171)

摘要: 为分析微电网各种运行模式尤其是非计划解列运行情况下对配电网中负荷点可靠性的影响, 提出一种基于改进故障模式与后果分析法的含微电网的配电网可靠性评估算法。在可靠性的评估过程中, 建立开关因子模型和分区简化模型, 降低含微电网的配电网的网络复杂性, 减少可靠性分析的计算量; 对传统的配电网潮流算法进行改进, 使之适用于微电网的不同运行模式。算例仿真结果验证了所建模型的有效性, 分析结果表明, 微电网对配电网中不同负荷点的可靠性的改善效果具有差异性, 且在提高负荷点可靠性参数方面具有选择性。

关键词: 配电; 微电网; 运行模式; 网络简化; 改进 FMEA 法; 可靠性; 评估

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.003

0 引言

近年来, 分布式发电(DG)技术获得了越来越多的应用^[1-3]。但 DG 直接接入大电网也会给电网带来一些不稳定因素^[4]。DG 相对大电网而言, 是一个不可控源, 往往采用限制与隔离的方式以应对其带来的问题, 难以充分发挥 DG 的优势。为更好地解决此问题, 人们引入现代电力电子技术和控制理论, 提出了微电网的概念^[5]。微电网将发电设备、储能装置、负荷以及控制装置等相结合, 形成一个单一的可控单元, 向用户供电的同时也可能对公用电网进行逆向供电^[6-9]。

文献[3, 10-11]分别进行了微电网的可靠性评估以及含微电网的配电网的可靠性分析, 但是都没有考虑微电网运行模式对用户可靠性的具体影响。文献[12]在配电网可靠性评估中考虑了 DG 孤岛运行的情况, 但是 DG 不能够完全代替微电网的运行特点。

微电网具有多种运行模式, 既可并网运行, 亦可孤岛运行, 而孤岛又有计划孤岛与非计划孤岛之分^[5]。此外, 为避免因微电网内部故障而引起整个微电网停电, 微电网还必须备有非计划解列方案。为分析微电网各种运行模式尤其是非计划解列运行模式对配电网可靠性的影响, 本文结合微电网的结构、控制与运行特点, 改进了传统的故障模式后果分析 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) 法, 进行了含微电网的配电网的可靠性评估。

1 微电网非计划解列运行

正常情况下, 微电网处于并网运行状态, 此时可以由大电网和微电网内部的 DG 联合给电网内负荷供电。当大电网出现故障或存在电能质量问题时, 微电网中心控制系统将断开微电网与大电网的连接而

进入自治运行模式, 即仅由微电网内部 DG 给负荷供电, 这就是非计划孤岛运行模式。有时为追求 DG 最大的经济效益, 微电网可主动与大电网隔离, 独立运行, 称为计划孤岛运行^[5]。

理想情况下, 微电网成功进入孤岛运行模式的概率应为 100%, 但是在实际运行中, 情况并非如此^[13]。由于微电网内部控制系统反应延迟、微电网内部功率不平衡引起频率振荡或者微电网内部设备故障等, 都有可能引起微电网的自治运行过程失败, 这种失败的概率称为孤岛失效率, 其和微电网的控制系统运行特点(主要指对控制信号的反应速度)、储能设备的大小、负荷的削减机制以及微电网内部发电功率与负荷大小的协调性等密切相关。精确的孤岛失效率的大小需要进行动态评估才能确定^[13-15], 本文为简便计算, 仅设定为静态值。

以上都是从经济性或者从大电网故障的角度来考虑微电网的运行控制模式, 为避免因微电网内部故障而引起整个微电网停电情况的发生, 微电网还必须预备有非计划解列方案^[16-18], 用以保证微电网内部重要负荷的供电。

非计划解列方案不需预先设定, 但必须预建孤岛划分模型并根据实际运行情况决定非计划解列方案, 可采用基于功率圆的最优孤岛划分方法:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i \in D} \omega_i l_i \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in D} \omega_i = 1, \quad \sum_{i \in D} l_i \leq P_{DC} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, D 为孤岛范围; P_{DC} 为 DG 容量; l_i 为负荷点 i 所带负荷的大小; ω_i 为权重系数。

模型采用深度优先搜索 DFS (Depth First Search) 方法来进行求解。首先从微电源所在馈线出发, 访问此顶点, 然后依次从未被访问的邻接点出发, 在满足式(1)的范围内, 遍历功率圆图(指以微电源为圆心, 以微电源的额定容量为半径的圆内所包含的负

荷点的集合),直至目标函数达到最大值。多次重复以上步骤,即可得到故障后的最优孤岛划分方案。这个孤岛的端点是孤岛方案执行时需要动作的开关的位置。

2 网络分区简化模型

含微电网的配电网中含有大量的开关。由于计算方向的不同,开关在配电网的可靠性评估过程中所起的作用也有较大差异,本文对和潮流方向一致的方向叫顺流方向,反之称逆流方向,见图 1,图中 SP_i 为电源点, S_i 为开关, e_i 为设备, C 为用户, downstream、upstream 分别为顺、逆流方向,实线箭头表示潮流方向,虚线箭头表示可靠性计算方向。

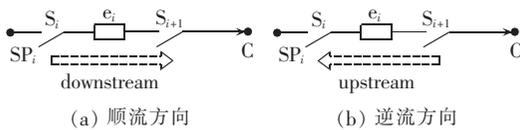


图 1 开关因子模型

Fig.1 Switch factor model

顺流方向计算过程中,开关与普通设备在可靠性分析上性质类同,其本身故障与其后对应的普通设备故障所引起的停电范围与效果相同,两者对下游电网可靠性的影响为:

$$\lambda_e = \lambda_i + \lambda_{s_i} \quad (2)$$

$$U_e = \lambda_i r_i + \lambda_{s_i} r_{s_i} \quad (3)$$

$$r_e = U_e / \lambda_e \quad (4)$$

其中, λ_i 、 r_i 为设备 e_i 的故障率、平均修复时间; λ_{s_i} 、 r_{s_i} 为开关 S_i 的故障率、平均修复时间; λ_e 、 r_e 、 U_e 为开关与设备对电网下游负荷点可靠性参数,即故障率、平均修复时间以及年平均停电时间的影响的等效值。

逆流方向计算时则有较大不同,设备故障时,相应开关所起的作用是断开该设备与上游电网的连接,成功率以其工作的可靠度来反映,考虑到一般配电网均配置有备用电源,故平均故障时间取为分段开关操作时间与设备故障修复时间的小者。两者对上游电网负荷点可靠性的影响的等效值为:

$$\lambda_e = (1 - p_i) \lambda_i \quad (5)$$

$$U_e = (1 - p_i) \lambda_i r_{\min\{r_i, r_d\}} \quad (6)$$

$$r_e = U_e / \lambda_e \quad (7)$$

其中, $r_{\min\{r_i, r_d\}}$ 为 r_i 与 r_d 的小者; r_d 为隔离开关操作时间; p_i 为开关可靠工作的概率。

图 2 是典型的辐射状结构馈线,图中 L_1 、 L_2 、... 表示馈线段, S_1 、 S_2 、... 表示开关(断路器、分段/隔离开关、熔断器等), T_{11} 、 T_{21} 、... 表示变压器, LP_{11} 、 LP_{21} 、... 表示负荷点, N/O 表示联络开关,各虚线所围 Z_1 、 Z_2 、...、 Z_{11} 、... 表示分区。任意选取一个支路如 S_{11} -

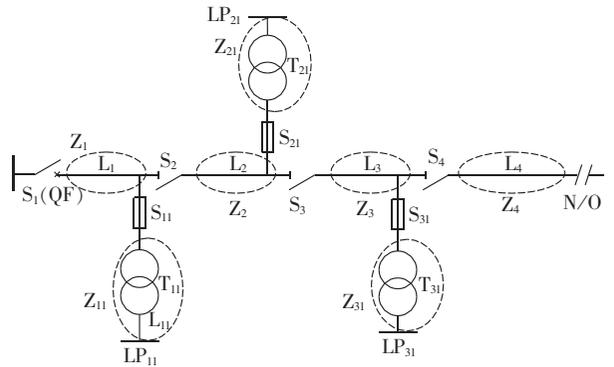


图 2 复杂馈线的分区简化模型

Fig.2 Simplified zone model of complex feeder

T_{11} - L_{11} - LP_{11} 为研究对象,依据开关的因子模型中式(2)、(5),得到式(8)、(9)。

顺流方向:

$$\lambda_e = \lambda_{s_{11}} + (\lambda_{d_{11}} + \lambda_{l_{11}}) = \lambda_{s_{11}} + \lambda_{(d_{11}+l_{11})} \quad (8)$$

逆流方向:

$$\lambda_e = (1 - p_{11}) (\lambda_{d_{11}} + \lambda_{l_{11}}) = (1 - p_{11}) \lambda_{(d_{11}+l_{11})} \quad (9)$$

其中, $\lambda_{d_{11}}$ 为变压器 T_{11} 的故障率, $\lambda_{l_{11}}$ 为线路 L_{11} 的故障率, $\lambda_{(d_{11}+l_{11})}$ 为支路 T_{11} - L_{11} 的故障率。

同理,如果开关(熔断器) S_{11} 后面有 n 个设备,那么以 $\sum_{i=1}^n \lambda_i$ 替代 $\lambda_{(d_{11}+l_{11})}$ 即可。对等效年平均停电时间 U_e 的处理方式类同,所用到的公式为式(3)、(6),且有 $r_e = U_e / \lambda_e$ 。

由式(8)、(9)可知,开关之间所包含的区域(本文称之为分区)在可靠性逻辑上属串联关系,同一分区内任一设备故障,系统中开关的动作情形完全相同,亦都会引起整个分区停电,故可采用多元件串联公式计算该分区的等效可靠性参数:

$$\lambda_Z = \sum_{j=1}^n \lambda_{Z_j} \quad (10)$$

$$U_Z = \sum_{j=1}^n \lambda_{Z_j} r_{\min\{r_{Z_j}, r_d\}} \quad (11)$$

$$r_Z = U_Z / \lambda_Z \quad (12)$$

其中, λ_{Z_j} 、 r_{Z_j} 为第 i 个分区中第 j 个设备的故障率、修复时间; λ_Z 、 r_Z 、 U_Z 为第 i 个分区的等效故障率、等效平均修复时间、等效年平均停电时间。

3 基于分区简化模型的 FMEA 法

3.1 分区故障类型分析

分区故障类型分析是确定负荷点停运类型和计算可靠性指标的基础^[19]。传统的 FMEA 法首先找出引起某一个负荷点全部停电或部分停电的故障类型或故障组合,然后形成故障列表^[20],最后计算可靠性指标,致使故障组合的搜索与分析比较复杂。本文以分区为核心,从分区故障对负荷点影响的角度来分析

和计算负荷点的可靠性。当分区中设备故障时,根据所引起的负荷点停电时间的不同,将分区分成 4 类^[21],设第 i 个分区的故障率、平均修复时间、年平均停电时间为 λ_{Z_i} 、 r_{Z_i} 、 U_{Z_i} ,则有如下结论。

a. 零停电时间分区 Z_0 ,即该分区内部有设备故障时,对负荷点无影响,负荷点停电时间为零。

b. r_d 停电时间分区 Z_{r_d} ,即该分区内部有设备故障时,负荷点停电时间为隔离开关操作时间 r_d ,其对第 j 个负荷点分区可靠性参数的贡献值为:

$$\lambda_{Z_j}^Z = \lambda_{Z_i} \quad (13)$$

$$U_{Z_j}^Z = \lambda_{Z_i} r_d \quad (14)$$

$$r_{Z_j}^Z = U_{Z_j}^Z / \lambda_{Z_j}^Z \quad (15)$$

c. r_d+r_i 停电时间分区 $Z_{r_d+r_i}$,即该分区内部有设备故障时,负荷点停电时间为隔离开关操作时间与切换操作时间之和,该分区对第 j 个负荷点分区可靠性参数的贡献值为:

$$\lambda_{Z_j}^Z = \lambda_{Z_i} \quad (16)$$

$$U_{Z_j}^Z = \lambda_{Z_i} (r_d+r_i) \quad (17)$$

$$r_{Z_j}^Z = U_{Z_j}^Z / \lambda_{Z_j}^Z \quad (18)$$

d. r_{Z_i} 停电时间分区 $Z_{r_{Z_i}}$,即该分区内部有设备故障时,负荷点停电时间为设备故障的平均修复时间,其对第 j 个负荷点分区可靠性参数的贡献值为:

$$\lambda_{Z_j}^Z = \lambda_{Z_i} \quad (19)$$

$$U_{Z_j}^Z = \lambda_{Z_i} r_{Z_i} \quad (20)$$

$$r_{Z_j}^Z = U_{Z_j}^Z / \lambda_{Z_j}^Z \quad (21)$$

其中, $\lambda_{Z_j}^Z$ 为分区 Z_i 对负荷点分区 Z_j 的故障率的贡献值; $U_{Z_j}^Z$ 为分区 Z_i 对负荷点分区 Z_j 的年平均停电时间的贡献值; $r_{Z_j}^Z$ 为分区 Z_i 对负荷点分区 Z_j 的平均修复时间的贡献值。

3.2 负荷点可靠性参数计算

把所有分区对各个负荷点分区的可靠性贡献值进行累加,即为负荷点分区的可靠性参数,然后计入本分区可靠性参数,即得到各个负荷点的可靠性参数,计算公式如下:

$$\lambda_{LP_j} = \lambda_{Z_j} + \sum_{i=1}^n \lambda_{Z_j}^Z \quad (22)$$

$$U_{LP_j} = U_{Z_j} + \sum_{i=1}^n U_{Z_j}^Z \quad (23)$$

$$r_{LP_j} = U_{LP_j} / \lambda_{LP_j} \quad (24)$$

其中, λ_{LP_j} 、 r_{LP_j} 、 U_{LP_j} 分别为负荷点 j 的故障率、平均修复时间、年平均停电时间。

3.3 FMEA 法可靠性计算框图

含微电网的配电网分区故障类型的分析可通过

最小路的搜索得到^[22-23],最小路搜索可采用深度优先搜索和广度优先搜索(BFS)法^[24],首先分析某一分区对各个负荷点分区的影响,判断该分区类型,然后根据开关分区对应信息,建立最小路矩阵列表。完整的可靠性评估算法的计算框图如图 3 所示。

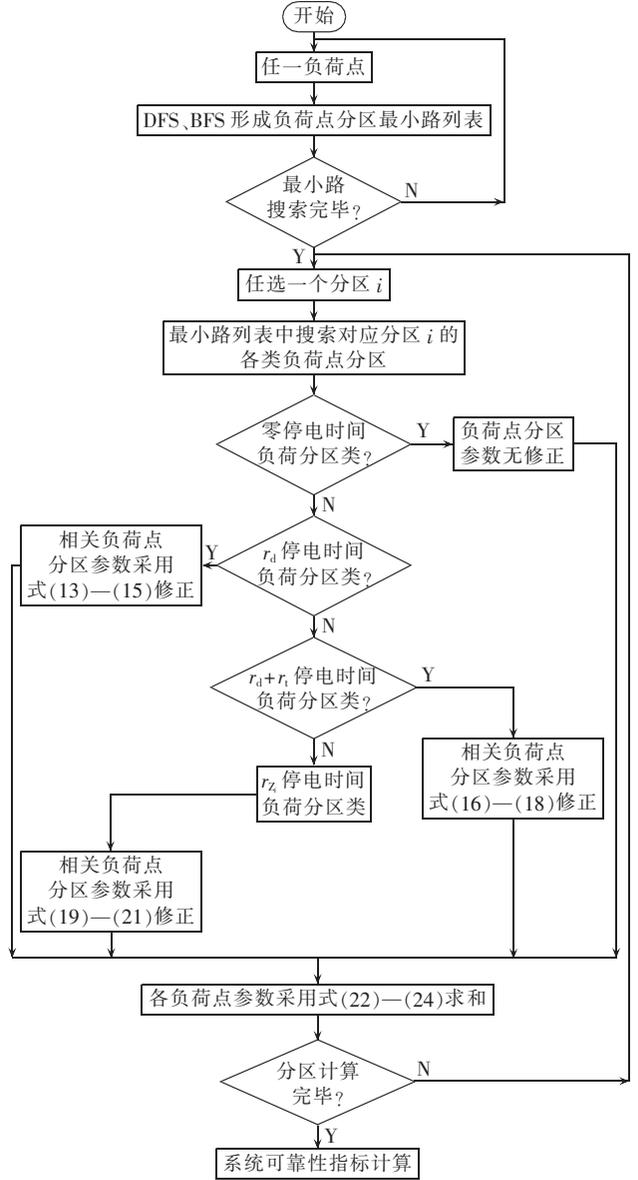


图 3 FMEA 法可靠性评估流程图
Fig.3 Flowchart of reliability evaluation based on FMEA

4 含微电网的配电网的潮流计算

含微电网的配电网除了能够从上级电网接受电能之外,其本身还含有多个微电源,是一个多电源、辐射状结构。这既与传统输电系统的多电源、环网状结构不同,也和传统配电网的单电源、辐射状结构存在差异,故必须对传统的潮流计算方法进行改进。本文针对微电网的不同运行模式对配电网潮流计算的牛顿法进行改进。

4.1 微电网并网运行

传统配电网中一般只包含平衡节点和 PQ 节点 2 种类型。其中变电站出口母线通常视为平衡节点,而其他节点一律视为 PQ 节点。

随着微电网的接入,当微电网处于并网运行模式时,含微电网的配电网中出现了多个微电源,故必须对这些微电源进行如下预处理。

a. PQ 节点: 即有稳定功率输出的微电源,视为“负的负荷”,当成 PQ 节点。

b. PV 节点: 迭代过程中,若无功功率越限,则把无功功率作为已知参数,即把 PV 节点转换成 PQ 节点;如果电压越界,则重新转换为 PV 节点。

c. PI 节点: 求出第 k 次迭代时该节点的无功功率注入量,在第 $k+1$ 次迭代过程中把 PI 节点转换为 PQ 节点。

d. PQ(V)节点: 该节点无功为节点电压函数,每次迭代前把 PQ(V)节点转换为 PQ 节点,其中有功为微电源输出的有功功率,无功为微电源吸收的无功功率与补偿无功功率的差值。

4.2 微电网孤岛运行

微电网孤岛运行时的潮流计算和并网运行时的方法大同小异。微电源的处理方式类同,但此时还要注意以下几点。

a. 此时含微电网的配电网处于解列状态,孤岛运行的微电网还需要设定一个平衡节点,一般选择具有旋转机构的微电源,如微型燃气轮机作为其平衡节点。

b. 除去孤岛运行的微电网外的其他部分的处理方式类似微电网并网运行时的处理方式。

c. 在潮流计算的流程中需加入孤岛判据,可通过微电网 PCC 的状态进行判定。

4.3 微电网非计划解列运行

此时微电网内部发生故障,须切除故障馈线,其余部分的处理方式类似微电网并网运行时的处理方式。

4.4 潮流计算步骤

基于牛顿法的含微电网的配电网的潮流计算迭代步骤如下。

a. 输入原始数据。

b. 判断微电网的运行状态: 若微电网均并网运行,则进行下一步;若有微电网孤岛运行,则为其设定平衡节点,然后进行下一步;若微电网非计划解列运行,则首先切除故障馈线,然后进行下一步。

c. 形成导纳矩阵。

d. 给定各节点的电压初值 $U^{(0)}$ 和相位初值 $\theta^{(0)}$ 。

e. 对网络中的 PV 节点设置无功功率限额。

f. 将网络中的 PI 节点和 PQ(V)节点转化为 PQ 节点。

g. 将电压初值 $U^{(0)}$ 和相位初值 $\theta^{(0)}$ 代入式 (25) 求修正方程的常数项 $\Delta P^{(0)}$ 、 $\Delta Q^{(0)}$ 。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P - P(\theta, U) \\ Q - Q(\theta, U) \end{bmatrix} \\ \left. \begin{aligned} P_i(\theta, U) &= U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i(\theta, U) &= U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, n \\ i &= 1, 2, \dots, n-r \end{aligned} \end{cases} \quad (25)$$

其中, r 为 PV 节点数。

h. 求解式 (26) 所示的修正方程式, 求出修正量 $\Delta U^{(0)}$ 、 $\Delta \theta^{(0)}$ 。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \\ J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (26)$$

i. 修正各节点的电压和相位:

$$\begin{cases} U^{(1)} = U^{(0)} + \Delta U^{(0)} \\ \theta^{(1)} = \theta^{(0)} + \Delta \theta^{(0)} \end{cases} \quad (27)$$

j. 以 $U^{(1)}$ 、 $\theta^{(1)}$ 代入式 (25) 中求 $\Delta P^{(1)}$ 、 $\Delta Q^{(1)}$ 。

k. 检验是否收敛, 若收敛, 则求各支路潮流并输出结果; 否则, 再以 $U^{(1)}$ 、 $\theta^{(1)}$ 为初值, 返回步骤 f 进行下一次迭代。同时检验 PV 节点的无功功率输出是否越限, 若越限, 则在以后的迭代中作为 PQ 节点处理, 且该节点无功功率值为越限值; 否则, 继续作为 PV 节点参与下一次迭代, 并在下一次迭代结束后做无功功率的越限检查。

5 可靠性计算流程

本文完整的可靠性评估的流程如下。

a. 输入原始数据。

b. 建立网络的分区简化模型, 依据式 (10) — (12) 进行参数归并。

c. 假定分区 Z_i 内部设备故障, 调用潮流计算模块进行潮流计算。

d. 判断需要进行微电网的非计划解列与否, 若需要, 采用式 (1) 进行解列方案的确定, 然后进行下一步; 否则, 直接进行下一步。

e. 调用可靠性计算模块进行可靠性计算。

f. 令 $i = i + 1$, 转步骤 c, 直至完成所有分区。

g. 输出结果。

6 算例分析

6.1 算例简介

本文采用经过改造的 Roy Billinton 可靠性测试系统母线 6^[25]的馈线 4 作为算例(在原标准系统上加入熔断器、分段开关、微电源等),系统的单线图如图 4 所示,共包含 F₄、F₅、F₆、F₇ 这 4 个馈线分支。分别在原网络的馈线段 20 和馈线段 28 处安装 DG,且设 DG₁ 为 5 MW, DG₂ 为 6 MW,整个馈线分支 F₅ 和馈线分支 F₇ 分别组成 2 个微电网,各原始数据见文献[25]。

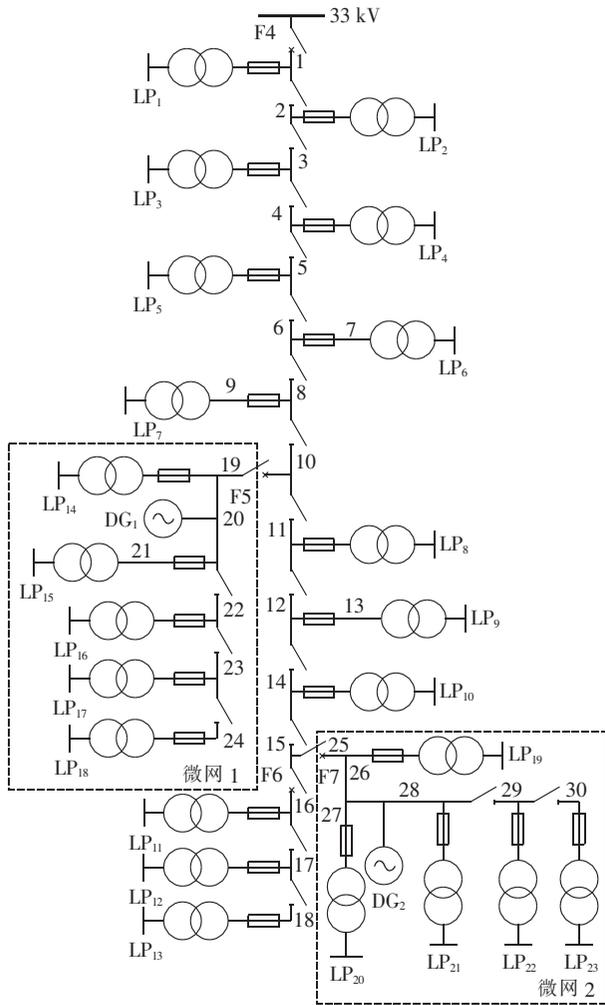


图 4 含 2 个微电网的配电网结构图

Fig.4 Distribution network containing two microgrids

6.2 结果分析

本文把负荷的重要性分为 3 种,即 $\omega_1=0.5, \omega_2=0.3, \omega_3=0.2$,并分以下几种情况进行了可靠性的分析计算。

a. 情况 1: 不含微电网,即设 2 个 DG 的容量均为零。

b. 情况 2: 只考虑微电网的非计划孤岛运行,此时微电网以一定的概率(本文取为 0.8)^[10]进入稳定自治运行模式。

c. 情况 3: 考虑微电网的非计划解列运行,采用基于功率圆的最优孤岛划分方法。

表 1—3 列出了部分负荷点的可靠性参数,表 4 列出了系统可靠性指标,表中 SAIFI 为系统平均停电频率指标,单位为次/(系统用户·a);SAIDI 为系统平均停电持续时间指标,单位为 h/(系统用户·a);CAIDI 为用户平均停电持续时间指标,单位为 h/(停电用户·a);ASAI 为平均可用率指标。可以得出以下结论。

表 1 部分负荷点可靠性指标(情况 1)

Tab.1 Reliability indices of selected load points(case 1)

负荷点	情况 1		
	$\lambda_{LP}/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$r_{LP}/(\text{h}\cdot\text{次}^{-1})$	$U_{LP}/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$
1	1.2900	3.111 628	4.014
8	1.2900	5.176 744	6.678
13	1.7150	5.714 286	9.800
14	1.4000	4.801 429	6.722
17	1.3950	5.707 527	7.962
19	1.9725	4.500 380	8.877
23	1.9350	5.519 380	10.680

表 2 部分负荷点可靠性指标(情况 2)

Tab.2 Reliability indices of selected load points(case 2)

负荷点	情况 2		
	$\lambda_{LP}/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$r_{LP}/(\text{h}\cdot\text{次}^{-1})$	$U_{LP}/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$
1	1.2900	0.520 155	0.671
8	1.2900	1.093 798	1.411
13	1.7150	1.400 000	2.401
14	0.7600	0.735 526	0.559
17	0.4350	9.475 862	4.122
19	0.8225	0.740 426	0.609
23	0.6975	8.215 054	5.730

表 3 部分负荷点可靠性指标(情况 3)

Tab.3 Reliability indices of selected load points(case 3)

负荷点	情况 3		
	$\lambda_{LP}/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$r_{LP}/(\text{h}\cdot\text{次}^{-1})$	$U_{LP}/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$
1	1.2900	0.520 155	0.671
8	1.2900	1.093 798	1.411
13	1.7150	1.400 000	2.401
14	0.4500	1.226 667	0.552
17	0.4750	6.578 947	3.125
19	0.6225	0.885 141	0.551
23	0.7375	6.549 153	4.830

表 4 系统可靠性指标

Tab.4 Reliability indices of system

系统指标	情况 1	情况 2	情况 3
SAIFI	1.457 060 440	1.190 739 645	1.157 825 866
SAIDI	6.667 762 468	1.598 336 010	1.464 621 302
CAIDI	4.576 174 251	1.342 305 194	1.264 975 455
ASAI	0.999 238 840	0.999 817 542	0.999 832 806

a. 和情况 1 相比,情况 2 和情况 3 中微电网内部的负荷点的可靠性参数均能够得到明显改善;微电网外部的负荷点的故障率基本没有变化,但是年

停电时间极大缩短;这显示微电网对配电网可靠性的具体改善效果会因负荷点的位置差异而有所不同。

b. 和情况 2 相比,情况 3 中孤岛内部的负荷点的可靠性参数有所提高,但孤岛外部的负荷点的可靠性参数有所恶化,说明孤岛在提高负荷点可靠性参数方面具有选择性;此外,系统可靠性指标改善明显,说明微电网的非计划解列能够从整体上提高系统的可靠性。

c. 从表 4 可以看出,3 种情况下系统可靠性指标的计算数值呈趋佳走势,说明考虑非计划解列运行的方案对提高可靠性方面效果最佳。

7 结语

为分析微电网的不同运行模式对配电网用户可靠性的不同影响,本文依据开关在可靠性计算过程中的不同作用对含微电网的配电网进行了网络简化与空间拓扑分析,然后对传统的 FMEA 法进行了改进。对计算结果进行的分析表明:

a. 微电网对配电网可靠性的具体改善效果会因负荷点的位置差异而有所不同;

b. 孤岛在提高负荷点可靠性参数方面具有选择性,但能够从整体上提高系统的可靠性;

c. 考虑非计划解列运行的方案对提高可靠性方面效果最佳。

参考文献:

- [1] 钱科军,袁越,石晓丹. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(29):11-15.
- [2] 钱科军,袁越,周承科. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电网技术,2008,32(11):74-78.
QIAN Kejun,YUAN Yue,ZHOU Chengke. Study on impact of distributed generation on distribution system reliability[J]. Power System Technology,2008,32(11):74-78.
- [3] BAE I S, KIM J O. Reliability evaluation of customers in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3):1416-1422.
- [4] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14,23.
WANG Chengshan,LI Peng. Development and challenges of distributed generation,the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10-14,23.
- [5] LASSETER R H. CERTS microgrid[C]//IEEE International Conference on System of Systems Engineering. San Antonio,Texas, USA:[s.n.],2007:1-5.
- [6] 盛腾,孔力,齐智平. 新型电网——微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器,2007,35(12):75-81.
SHENG Kun,KONG Li,QI Zhiping. A survey on research of microgrid—a new power system[J]. Relay,2007,35(12):75-81.
- [7] 鲁宗相,王彩霞,闵勇. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-106.
LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(19):100-106.
- [8] 郑漳华,艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术,2008,32(16):27-31.
ZHENG Zhanghua,AI Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology,2008,32(16):27-31.
- [9] 袁越,李振杰,冯宇. 中国发展微网的目的方向前景[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):59-63.
YUAN Yue,LI Zhenjie,FENG Yu. Development purposes, orientations and prospects of microgrid in China[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):59-63.
- [10] COSTA M P,MOTOS M A. Assessing the contribution of microgrids to the reliability of distribution networks[J]. Electric Power Systems Research,2009,79(2):382-389.
- [11] 解翔,袁越,李振杰. 含微电网的新型配电网供电可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):67-72.
XIE Xiang,YUAN Yue,LI Zhenjie. Reliability analysis of a novel distribution network with microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(9):67-72.
- [12] 孙瑜,BOLLEN M,AULT G. 孤岛状态下含分布式电源的配电系统可靠性分析[J]. 电网技术,2008,32(23):77-81.
SUN Yu,BOLLEN M,AULT G. Reliability analysis of islanded distribution systems with distributed energy resources[J]. Power System Technology,2008,32(23):77-81.
- [13] MOREIRA C L,PEAS L J A. Microgrids dynamic security assessment[C]//International Conference on Clean Electrical Power, 2007. ICCEP'07. Capri,Italy:[s.n.],2007:21-23.
- [14] CAIRE R,RETIERE N,MARTINO S,et al. Impact assessment of LV distributed generation on MV distribution network[C]//2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago, IL,USA:[s.n.],2002:1423-1428.
- [15] LOPES J A,MOREIRA C L,MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(2):916-923.
- [16] 丁磊,潘贞存,丛伟. 基于有根树的分布式发电孤岛搜索[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):62-67.
DING Lei,PAN Zhencun,CONG Wei. Searching for intentional islanding strategies of distributed generation based on rooted tree[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(25):62-67.
- [17] 易新,陆于平. 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J]. 电网技术,2006,30(7):50-54.
YI Xin,LU Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators[J]. Power System Technology,2006,30(7):50-54.
- [18] 刘传铨,张焰. 计及分布式电源的配电网供电可靠性[J]. 电力系统自动化,2007,31(22):46-49.
LIU Chuanquan,ZHANG Yan. Distribution network reliability considering distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(22):46-49.
- [19] 任倩,张勇军,任震. 基于馈线分块等值的中压配电网可靠性评估改进 FMEA 法[J]. 电力自动化设备,2007,27(12):53-57.
REN Qian,ZHANG Yongjun,REN Zhen. Improved FMEA

- method for reliability evaluation of mid-voltage distribution system based on divided feeder equivalence [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 53-57.
- [20] 张鹏,郭永基. 基于故障模式影响分析法的大规模配电系统可靠性评估[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2002, 42(3): 353-357. ZHANG Peng, GUO Yongji. Large scale distribution system reliability evaluation based on failure mode and effect analysis [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42(3): 353-357.
- [21] 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.
- [22] 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. DAI Wenxia, WU Jie. Fast evaluation for distribution network reliability based on minimal path [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(7): 29-31.
- [23] XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi, BILLINTON R. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage electrical distribution networks based on the shortest path [J]. IEE Proc-Gener Transm Distrib, 2003, 150(6): 686-690.
- [24] SHIMON E. Graph algorithms [M]. 2nd ed. London, UK: Cambridge University Press, 2011: 46-62.
- [25] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.

作者简介:

王枫(1983-),女,河南周口人,博士研究生,主要从事电力系统可靠性、分布式发电与微电网、高电压设备试验与测试技术等方面的研究(E-mail: wangfeng0818@163.com);

祁彦鹏(1982-),男,河南周口人,工程师,硕士,主要从事电力系统规划及可靠性、安全分析与风险评估、分布式发电与微电网等方面的研究(E-mail: qiyanpeng112233@163.com);

傅正财(1965-),男,浙江衢州人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事高电压试验技术与试验设备开发、电力系统电磁环境与电能质量、电力系统过电压与防雷保护等方面的研究(E-mail: zcfu@sjtu.edu.cn)。

Reliability evaluation of distribution system considering unintentional splitting operation of microgrid

WANG Feng¹, QI Yanpeng², FU Zhengcai¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. State Grid Tianjin Economic Research Institute, Tianjin 300171, China)

Abstract: A method of reliability evaluation based on the modified FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) is proposed for the distribution network containing microgrid, which analyzes the impact of the operational modes of microgrid, especially its unintentional splitting operation, on the reliability of load points. The switch factor model and simplified zone model are built during reliability evaluation to reduce the complexity of distribution network containing microgrid and the computational load of reliability analysis. The traditional distribution network power flow algorithm is improved to adapt different operational modes of microgrid. Results of case simulation show the effectiveness of the built models and analysis proves that, the impacts of microgrid on the reliability improvement of different load points are different and its effects on different reliability indexes of load point are different as well.

Key words: electric power distribution; microgrid; operational mode; network simplification; modified FMEA method; reliability; evaluation

安科瑞电气火灾监控系统通过国家强制性 CCC 认证

2013年8月,安科瑞电气股份有限公司研制的剩余电流式电气火灾监控探测器以及电气火灾监控设备顺利通过公安部消防产品合格评定中心的审核,获得中国国家强制性产品认证 CCC 证书。



(安科瑞电气股份有限公司)