

含微电网的新型配电网供电可靠性分析

解 翔, 袁 越, 李振杰

(河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 210098)

摘要: 新型配电网结构——微电网是智能电网的有机组成部分, 它能有效提高用户的安全性和可靠性。根据新兴微电网的特点, 总结出含微电网的配电网可靠性算法。通过分析微电网加入配电网后可靠性指标的改善, 评估微电网对配电网可靠性的影响。以实际系统为例, 应用所述算法, 从可靠性参数角度, 给微电网安装的位置和容量提出建议。

关键词: 微电网; 配电网; 智能电网; 可靠性分析

0 引言

长期以来, 由于发电、输电系统的投资量巨大, 故障的后果严重, 而配电系统的投资相对较小, 故障产生的影响也大多位于局部地区, 导致了配电系统的受关注程度远低于发电和输电系统。然而电力系统的根本任务是尽可能经济且可靠地将电能输送给用户, 配电系统处于与用户距离最近的环节, 应该受到重视。而且随着经济的发展, 供电需求的增加, 即使是局部地区的停电也可能造成较大影响。特定地区的停电不但可能造成巨大的经济损失, 危及社会秩序, 甚至可能成为危及国家安全的重大事件。因此, 配电系统可靠性问题受到了世界各国的高度重视, 可靠性评估已经成为配电系统规划和运行决策中的一项重要工作。

智能电网^[1]作为未来电网规划和建设的方向, 能有效满足用户安全、可靠和多样化的供电需求。在智能电网的概念下, 配电和用电的智能化是研究的重点, 而未来智能化的配电网将是智能电网的主要组成部分。微电网作为智能配电网的有机组成部分, 具有自治、稳定、兼容、灵活、经济的特点, 可灵活、高效地利用分布式电源, 提高电网的利用率, 改善用户供电可靠性和电能质量, 实现电网的安全稳定运行。微电网有并网和自治 2 种运行方式^[2], 并网运行时可以由大电网和内部分布式电源联合给网内负荷供电, 当大电网出现故障或存在电能质量问题时, 可以由微电网中心控制系统控制微电网与主网断开进行自治运行, 即仅由内部分布式电源给负荷供电, 当故障解除后, 微电网重新恢复并网运行。

而智能化的微电网, 将先进的信息技术、控制技术与电力技术相结合, 能为用户和系统提供更高的可靠性并实现经济与能源效益最大化, 还能有效提高电力系统抵御自然灾害的能力^[3]。文献[2, 4]中具体阐述了微电网的特点、结构和关键技术。

本文以配电系统的可靠性参数^[5]为参考, 根据新兴微电网概念的特点, 分析微电网的加入对于配电网用户和系统可靠性的改善程度, 提出适合微电网的可靠性计算方法, 并从可靠性的角度给微电网的安装位置提出了建议。

1 配电网与微电网的可靠性分析

1.1 可靠性指标

通过可靠性参数分析法, 可以对系统可靠性水平进行深入分析, 查找系统中可靠性的薄弱环节, 并且针对这些薄弱环节提出有效的改进措施, 合理安排网络结构和计划停电时间; 还可以根据系统的可靠性参数, 在满足规定的可靠性指标的同时最大限度地提高经济效益, 即在可靠性增益与经济成本之间找到一个最佳平衡点。本文的研究采用如下可靠性指标。

负荷点的可靠性指标:

- 1) 年故障停运率 λ_l (次/a);
- 2) 年平均停运持续时间 U_l (h/a);
- 3) 平均停电持续时间 r_l (h/次);
- 4) 年平均缺电量 e_l (MW)。

系统可靠性指标如下:

1) 系统平均停电频率指标 (system average interruption frequency index, SAIFI), 记为 I_{SAIFI} :

$$I_{SAIFI} = \frac{\sum \lambda_l N_l}{\sum N_l} \quad (1)$$

式中: N_l 为负荷点 l 的用户数。

收稿日期: 2010-09-18; 修回日期: 2011-01-10。

高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20090094110016); 江苏省高校“青蓝工程”资助项目。

2) 系统平均停电持续时间指标(system average interruption duration index, SAIDI), 记为 I_{SAIDI} :

$$I_{SAIDI} = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (2)$$

3) 用户平均停电持续时间指标(customer average interruption duration index, CAIDI), 记为 I_{CAIDI} :

$$I_{CAIDI} = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} \quad (3)$$

4) 平均供电可用率指标(average service availability index, ASAI), 记为 I_{ASAI} :

$$I_{ASAI} = \frac{8\ 760 \sum N_i - \sum U_i N_i}{8\ 760 \sum N_i} \quad (4)$$

5) 期望缺供电量(expected energy not supplied, EENS), 记为 I_{EENS} :

$$I_{EENS} = \sum e_i \quad (5)$$

1.2 含微电网的低压配电网可靠性分析

1.2.1 传统低压配电网

传统低压配电网由断路器、若干条馈线、负荷支路、分段开关、联络线及联络开关构成, 负荷沿途分布在馈线两侧。由输电线路经中压配电网给低压网络供电。当配电网内某馈线发生故障时, 这条馈线上的所有用户都将停电直到故障线路修复完毕。

如果低压网络与中压网络的连接点处装有熔断器, 则低压网络线路的故障不会影响到中压网络线路和中压网络上其他负荷点的供电。如果低压网络所在的中压馈线发生故障, 则会影响到低压网内的用户。

由文献[5]可以得到没有任何孤立设备的传统配电网的计算方法。传统低压网络用户的可靠性指标如下:

$$\begin{cases} \lambda_c = \frac{\sum_{i \in f} \lambda_i + \sum_{j \in f_{up}} \lambda_j}{\lambda_c} \\ r_c = \frac{\sum_{i \in f} \lambda_i r_i + \sum_{j \in f_{up}} \lambda_j r_j}{\lambda_c} \\ U_c = \lambda_c r_c \end{cases} \quad (6)$$

式中: f 为低压网络用户所在馈线集合; f_{up} 为低压网络连接的中压网络馈线集合; λ_i 和 r_i 分别表示低压馈线的年故障停运率和年平均停电持续时间; λ_j 和 r_j 分别表示中压馈线的年故障停运率和年平均停电持续时间; 下标 c 表示与用户相关的可靠性。

在研究低压网络用户的可靠性时, 对于上层中压网络的 λ_j 和 r_j 可以用等值算法[6]得到, 对于含有

多个分支线路的复杂配电网的可靠性计算, 则可以在网络等值简化后根据最短路算法[7]依次求得每个负荷点的可靠性参数。

传统低压配电网上的用户极易受馈线上故障的影响, 且修复时间较长, 对于突发故障缺乏必要的应对措施, 难以满足用户对于可靠性越来越高的要求。

1.2.2 微电网结构的低压配电网

如果将低压配电网的传统结构改造成微电网, 那么可靠性分析将完全不同。

微电网以其先进的监测控制技术, 可以实时监测出上层馈线或者微电网内部线路以及元件的故障, 或者是电能质量的问题。为了保证网内用户的供电不受影响或者微电网内故障不对上层馈线上的其他用户造成影响, 微电网控制系统将控制微电网与主网脱离, 仅由内部分布式电源和储能设备供电, 形成一个小型的能源网络, 给网内各用户供电[8]。

在微电网先进的控制技术、储能技术和电力电子技术条件下, 这一过程完全可实现, 有时甚至可以预测出上层线路的可能故障与隐患或者气候灾害等突发事件, 提前控制微电网内各设备做好应对准备。微电网在主网供电与内部供电之间灵活切换与互补的功能极大地提高了能源的优化配置, 增强了供电的可靠性。

在具体的计算方法中, 由于这个切换过程相对很短[9]并且微电网有时能成功预测到潜在的故障, 所以可以近似认为上层故障不影响网内的用户。此时网内用户的可靠性参数就变成:

$$\begin{cases} \lambda_c = \sum_{i \in f} \lambda_i \\ r_c = \frac{\sum_{i \in f} \lambda_i r_i}{\lambda_c} \\ U_c = \lambda_c r_c \end{cases} \quad (7)$$

当然这是最理想的状况, 文献[10]中提出, 实际操作中并非每次微电网都能够成功与主网脱离并顺利完成自治运行。由于内部控制系统或者电力电子元件的故障, 有可能造成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, 设为 P_M 。此时用户的可靠性参数由以下方法计算:

$$\begin{cases} \lambda_c = \sum_{i \in f} \lambda_i + P_M \sum_{j \in f_{up}} \lambda_j \\ r_c = \frac{\sum_{i \in f} \lambda_i r_i + P_M \sum_{j \in f_{up}} \lambda_j r_j}{\lambda_c} \\ U_c = \lambda_c r_c \end{cases} \quad (8)$$

这些都是建立在微电网内部的分布式电源容量足够大的情况下, 即是在自治运行的情况下, 微电网

内的所有用户都可以由微电源供电,发载比^[10](微电源的容量与负荷的比值)大于1。

微电网的能量管理系统(EMS)不但能够控制微电网与主网进行自由的能量交换,还能提供先进的分级服务,即为了保证网内的最优能源配置,在自治过程中出现网内分布式电源及储能设备不足以带动所有负载的情况下,会选择切除一些非重要负荷^[5],以保证重要负荷得到优质的电能供应。此时,对于这部分需要切除的用户而言,可靠性参数的计算同式(6)。系统的可靠性参数将发生变化,以SAIFI为例:

$$I_{SAIFI} = \frac{\sum_{i \in C_{mt}} \lambda_i N_i + (1 - P_M) \sum_{i \in C_m} \lambda_i G_i N_i + P_M \sum_{i \in C_m} \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (9)$$

式中: C_{mt} 为中压网络上传统低压网络用户; C_m 为中压网络上微电网用户; G_i 为节点*i*所加微电网的发载比,为保证微电网的稳定运行,计算时一般都需要适当降低 G_i 。

这里需要说明的是,公式中负荷点*i*的参数均为等值后或者简化后的低压网络整体参数,与之前具体分析的低压网内用户的可靠性参数略有不同。其他系统的可靠性参数可依此类推。

虽然在分布式电源容量不足的情况下,部分用户在故障期间需要被切除,但是在故障修复后,智能化的微电网可以自动切换到并网运行状态。这些被切除的用户可靠性最差也与传统配电网用户相同。但是通过微电网内智能化的负荷管理,这些用户的可靠性总体上还是得到了提高。

1.3 含微电网的中压配电网可靠性分析

1.3.1 传统中压配电网

传统的配电网结构中,计算由各低压网络、馈线、隔离开关等组成的中压配电网的可靠性参数时,将低压网络负荷点作为一个整体参与负荷点的可靠性计算,如需继续计算网络内部各用户的可靠性参数,则运用等值算法继续向下等值即可。根据文献[5-7],可以总结出基本的中压网络负荷的可靠性参数计算方法:

$$\begin{cases} \lambda_p = \sum_{i \in f} \lambda_i \\ U_p = \sum_{i \in \Delta} \lambda_i t_r + \sum_{i \in \Omega} \lambda_i t_q + \sum_{i \in \Psi} \lambda_i t_c \end{cases} \quad (10)$$

式中: λ_p 和 U_p 分别表示中压馈线负荷点的年故障停运率和年平均停电持续时间; Δ 区域线路发生故障时,负荷点必须等到故障完全修复后才能重新获

得供电; t_r 为线路修理的平均时间; Ω 区域发生的故障可以通过隔离开关将故障线路隔离,并且在断路器设备的重合闸之后可以由主网继续给负荷点供电; t_q 为隔离开关和短路设备动作时间的最大值; Ψ 区域发生的故障,负荷点可以通过网络重构,由其他未发生故障的馈线继续供电; t_c 为隔离开关动作时间和重构完成时间的最大值。

1.3.2 加入微电网后的中压配电网

前文叙述的微电网的特点除了能给微电网内的用户带来可靠性的改善之外,还能对中压网络上的其他用户和整个配电网系统的可靠性提高起到帮助。这主要体现在以下2个方面:

1)帮助尽可能多的用户实现网络的重构^[10]

由于考虑线路载流量限制,在故障发生时并非所有的用户都可以通过网络的重构获得重新供电,而无论是故障馈线上的微电网还是重构馈线上的微电网都可以明显降低线路的负荷,换句话说,相当于将线路的容量限制扩大了。

设图1中每条馈线的负载限制为 P_{MAX} ,馈线F1和F2所带负载总和分别为 P_{F1} 和 P_{F2} 。当F1线路的第4段发生故障之后,断路器跳闸,整条线路停电,如果此时 $P_{MAX} - P_{F2} \geq P_7$,则负荷L7内的所有用户将可以通过网络重构重新获得供电,停电时间即为网络的重构时间。如果 $P_{MAX} - P_{F2} < P_7$,则不能完成重构,负荷L7内的用户必须等到第4段线路上的故障修复之后才能重新获得供电。而对于负荷L5,则要满足 $P_{MAX} - P_{F2} - P_7 - P_6 \geq P_5$,才能通过重构实现负荷L5的继续供电,这在技术上是比较难实现的。

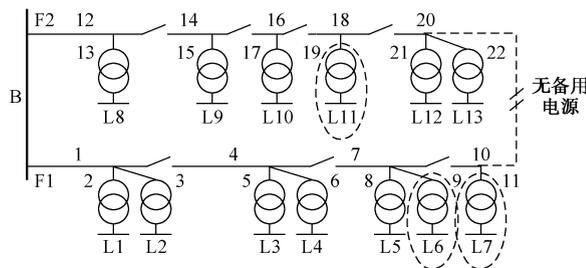


图1 中压网络的重构
Fig. 1 Reconstruction of medium voltage network

如果将负荷L6,L7,L11加入微电网之后,微电网可以有效配合网络重构的完成,虽然是馈线F1上发生故障,负荷L11上的微电网也将切换到自治运行。同样当第4段线路发生故障的时候,负荷L5只需满足 $P_{MAX} - P_{F2} + P_{11} \geq P_5$ 即可完成重构,这显然容易实现得多。并且只要容量允许,可以将更多的负荷点连入到重构线路中去。

考虑孤岛失效率 P_M 后的非微电网负荷点(微电网可影响到)的可靠性参数为:

$$\begin{cases} \lambda_p = \sum_{i \in f} \lambda_i \\ U_p = \sum_{i \in \Delta \setminus \Psi} \lambda_i t_r + \sum_{i \in \Omega} \lambda_i t_q + \\ (1 - P_M) \sum_{i \in \Psi} \lambda_i t_c + P_M \sum_{i \in \Psi} \lambda_i t_r \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\Delta \setminus \Psi$ 表示集合 Δ 减 Ψ 。

这样只要根据线路的容量限制对馈线上的负荷点逐一进行分析就可得到整个系统的可靠性参数。

2) 容量足够时可以给更多的负荷供电

微电网的特点决定了它是大电网的一个高效、坚强的补充,其高级的 EMS 可以实现能源的最优配置。当微电网的容量足够时,就可以向主网输送多余的功率^[11],当微电网的数量达到一定规模时可以有效弥补大电网电力的不足。

在故障情况,特别是自然灾害造成的危机情况下,微电网可以根据具体的情况计算出当时的分布式电源容量和能源储备能够保证多少用户供电。与断路设备配合形成新的馈线孤岛^[12],这与文献[13]中提到的中压微电网类似。除了自然灾害和突发紧急情况外,即使是上层网络的电能质量问题或者是上层线路正在计划检修,为了保证重要负荷和对电能质量要求较高的负载能够得到高质量的持续电能,微电网也将切换到自治运行,并给更多的负荷提供电能。相当于形成了一个微型的供电系统,比原先的大电网更加灵活和安全。这一过程中,微电网的 EMS 能够保证在新构成的网络中实现最优潮流分布和能源配置,以及系统的安全稳定运行。

微电网的这一特点不但极大地提高了整个配电网的可靠性和抵御自然灾害的能力,也将使更多的用户得到优质的电能供给,同时最大限度地发挥了分布式电源的优势。

哪些负荷可以在故障或者危机情况下由微电网供电不仅取决于微电网的容量和自身的负载,也取决于连入配电网的位置,比如还要考虑到不能影响到故障线路的隔离。要具体确定重构后的中压微电网结构还需要引入孤岛划分的概念。

假设在故障情况下,微电网给额外负荷供电是一个连续的过程,则这些额外负荷的可靠性指标将变成:

$$\begin{cases} \lambda_p = P_M \sum_{i \in A} \lambda_i + \sum_{i \in B} \lambda_i \\ U_p = P_M \left(\sum_{i \in \Delta \setminus B} \lambda_i t_r + \sum_{i \in \Omega} \lambda_i t_q + \sum_{i \in \Psi} \lambda_i t_c \right) + \sum_{i \in B} \lambda_i t_r \end{cases} \quad (12)$$

式中: $A \cup B = f$, 区域 B 为馈线上由于需要隔离故障等原因无法由微电网继续供电的部分,其余为区域 A 。

不过,并非微电网对外输送的功率越大越好,当微电网向主网渗透的功率过大时会引起主网稳定性方面的问题^[14],所以对于具体微电网向主网输送多大的电能还需要进一步的研究。

2 算例分析

本文采用的算例为 IEEE RBTS-Bus 6 配电系统。该系统包括 4 条主馈线,一共有 64 条线路,46 个节点,40 个负荷点,40 个熔断器,38 个用户变压器,见附录 A 图 A1。其中 11 kV 线路故障率为 0.065,修复时间为 5 h。33 kV 线路故障率为 0.046,修复时间为 8 h。变压器故障率为 0.015,修复时间为 200 h,隔离开关动作时间为 1 h,重构过程持续时间为 1.5 h。馈线 F3 和 F4 的载流量限制为 1.6 MW。加入微电网时,设微电网内部线路和所连馈线上的一切故障都会造成微电网的离网运行,并根据文献[10],设定孤岛失效率为 0.3。在计算过程中,为了使结果更加直观,忽略了各支路变压器的故障,并且计算可靠性时只计算到各中压配电网负荷点的可靠性,不再向下继续等值,如有必要可以继续按相同的原理继续完成这一工作。

在负荷点 L1~L40 上逐一加装微电网(容量 2.5 MW),算出加装前后系统各可靠性指标的变化。由于在馈线 F1 和 F2 上加装微电网对于馈线 F4 上的用户没有任何影响,同样为了使结果更加直观,将系统分为左右 2 个部分:馈线 F4 上的所有用户为左半系统,其余为右半系统。

在各个负荷点加装微电网后,系统的各可靠性指标都有不同变化,以不同的可靠性指标为最优目标,选择出安装微电网的最佳负荷点也不相同。各指标计算结果见附录 A。这里根据文献[15],选择 EENS 指标进行对比分析,结果见图 2、图 3。

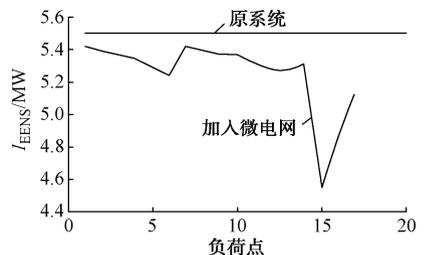


图 2 L1~L17 分别加入微电网后系统的 EENS
Fig. 2 EENS of system after installing microgrid in L1~L17

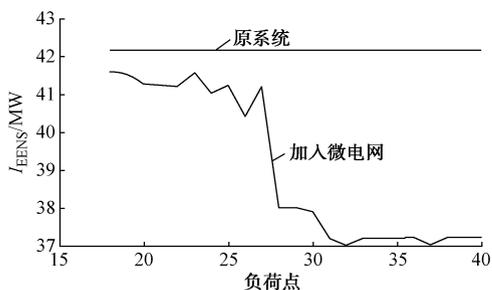


图3 L18~L40 分别加入微电网后系统的 EENS
Fig. 3 EENS of system after installing microgrid in L18~L40

表 1 负荷点可靠性参数对比
Tab. 1 Comparison of load point reliability parameters

负荷点	原系统			加入微电网($R_{GL}=1.2$)		
	λ	r	U	λ	r	U
L4	0.315 25	3.845 36	1.212 25	0.315 25	3.845 36	1.212 25
L5	0.325 00	4.360 00	1.417 00	0.325 00	2.365 00	0.768 63
L6	0.315 25	2.510 31	0.791 38	0.094 58	2.510 31	0.237 41
L10	0.344 50	3.377 36	1.163 50	0.344 50	3.377 36	1.163 50
L11	0.354 25	4.009 17	1.420 25	0.354 25	2.371 56	1.163 50
L13	0.354 25	2.366 97	0.838 50	0.106 28	2.366 97	0.251 55

表 2 系统可靠性指标对比
Tab. 2 Comparison of system reliability indices

指标	原系统 可靠性指标	加入微电网后系统可靠性指标		
		$R_{GL}=0.6$	$R_{GL}=1.2$	容量足够大 (2.5 MW)
SAIFI	0.722 80	0.679 33	0.650 35	0.650 35
SAIDI	4.094 88	3.791 93	3.565 92	3.354 73
CAIDI	5.665 33	5.581 88	5.483 08	5.158 34
ASAI	0.999 50	0.999 60	0.999 60	0.999 60
EENS	47.671 40	45.135 30	43.389 50	38.402 00

3 结果分析

1)在配电网中采用微电网结构能有效改善微电网用户的可靠性指标,可以将一般故障甚至自然灾害引起的主网断电对用户的影响降低。

2)微电网的加入也可以使某些非微电网用户的可靠性得到改善,由于必须等待故障隔离,这些非微电网用户只有停电时间指标得到改善。

3)将多用户负荷点建成微电网对可靠性改善相对较大(如 L15);微电网离重构线路越近,越能有效降低重构的难度(如 L6),网外用户离微电网越远得到的改善效果越差或者基本没有改善(如表 1 中对比 L4 和 L5)。

4)微电网内部的发载比对可靠性的改善程度有很大的影响,相对发载比越大,可靠性提高越多。当然发载比过大也会影响微电网并网的稳定运行^[14],造成资源的浪费,降低微电网建设的经济性。

考核 EENS 指标,在 4 条馈线上分别选择在负荷点 L33,L15,L6,L13 架设微电网。建立在这 4 个负荷点架设微电网后的新配电网系统,再次计算其可靠性指标,对比在不同发载比 R_{GL} 下系统的各可靠性指标。表 1 列举了几个负荷点的可靠性参数变化,表 2 显示的是整个配电网系统可靠性指标的变化。更加精确的计算需要综合考虑各方面的因素,将在以后的研究中加以完善。

5)国家电网公司对于配电网的可靠性指标有明确的要求^[16],微电网的加入能使配电网运行可靠性达标的同时有裕度可以安排更多的计划停电检修。

4 结语

微电网以其先进智能的技术体系和设备,极大地改善了用户和配电系统的供电可靠性,增强抵御自然灾害和应对突发故障的能力。

微电网可靠性分析可作为含微电网的新型配电网规划的一个重要参考,对微电网安装位置和容量提供建议。本文对含微电网的配电网可靠性分析做了综合的探讨,一份完整的微电网可靠性分析报告还需要其他方面更加深入的研究,需要更加精确地计算可靠性指标;中压微电网的具体结构需要结合孤岛划分进行分析^[17];微电网容量和位置的最终确定还需要从经济性和稳定性的角度综合考虑。

虽然有些功能在技术上暂时还难以实现。相信随着电力科学技术的不断发展,微电网的概念将很快得以实现。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 余贻鑫.面向 21 世纪的智能配电网[J].南方电网技术研究, 2006,2(6):14-16.
YU Yixin. Intelli-D-grid for the 21st century[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(6): 14-16.

- [2] 李振杰,袁越. 智能微网——未来智能配电网新的组织形式[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 42-48.
LI Zhenjie, YUAN Yue. Smart microgrid: a novel organization form of smart distribution grid in the future[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 42-48.
- [3] 伍磊,袁越,季侃,等. 微型电网及其在防震减灾中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 32-36.
WU Lei, YUAN Yue, JI Kan, et al. Microgrid and its application in earthquake prevention and disaster reduction[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 32-36.
- [4] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [5] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [6] 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.
WAN Guocheng, REN Zhen, TIAN Xiang. Study on model of reliability-network-equivalent of distribution system reliability evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 48-52.
- [7] 周念成,谢开贵,周家启,等. 基于最短路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.
ZHOU Niancheng, XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi, et al. Reliability evaluation of large scale distribution systems using the shortest path algorithm and section technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 39-44.
- [8] LOPES A, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [9] 李鹏,张玲,王伟,等. 微网技术应用与分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 109-115.
LI Peng, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. Application and analysis of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 109-115.
- [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] 丁明,张颖媛,茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 6-11.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 6-11.
- [12] 王旭东,林济铿. 基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 38-43.
WANG Xudong, LIN Jikeng. Reliability evaluation based on network simplification for the distribution system with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 38-43.
- [13] LUO Yi, WANG Longjun, ZHU Gelan, et al. Network analysis and algorithm of microgrid reliability assessment[C]// Proceedings of 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), March 28-31, 2010, Chengdu, China: 1-4.
- [14] 张佳佳,陈金富,范荣奇. 微电网高渗透对电网稳定性的影响分析[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(1): 25-29.
ZHANG Jiajia, CHEN Jinfu, FAN Rongqi. Investigation of the influence of microgrids high large penetration ratios on power network stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(1): 25-29.
- [15] 张焰. 电网规划中的可靠性成本-效益分析研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 33-36.
ZHANG Yan. Research on cost-benefit analysis of electric power network reliability planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15): 33-36.
- [16] DL/T 836—2003 供电系统用户供电可靠性评价规程[S]. 2003.
- [17] 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 distribution generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 46-49.

解 翔(1986—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:智能电网与微电网。E-mail: lemon_xie@163.com

袁 越(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行分析与控制、现代电力系统规划与运营、电力经济技术与运行管理、新能源与节能新技术。E-mail: yyuan@hhu.edu.cn

李振杰(1984—),男,博士研究生,主要研究方向:新能源发电与微电网技术。E-mail: lzj3690husr@163.com

Reliability Analysis of a Novel Distribution Network with Microgrid

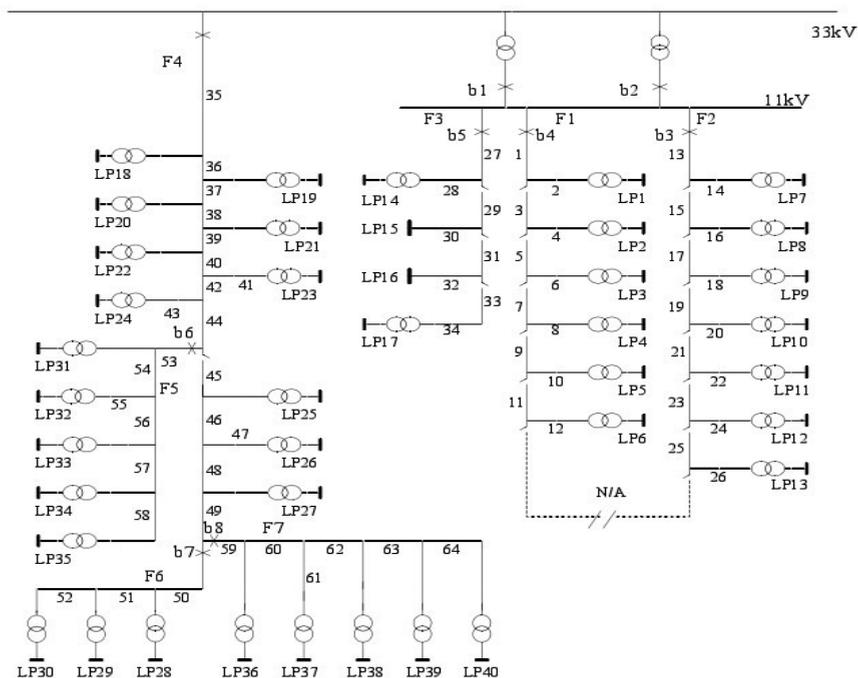
XIE Xiang, YUAN Yue, LI Zhenjie
(Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A novel distribution network structure, the microgrid, is an integral part of the smart grid capable of effectively improving user security and reliability. According to the characteristics of the burgeoning smart microgrid, a reliability algorithm for distribution network with smart microgrid is concluded. The impact of microgrid on the reliability of distribution network is assessed by analyzing the improvement of reliability parameters. With this algorithm, the reliability of the test system is achieved, with which, some recommendations about location and capacity of the microgrid are made.

This work is supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20090094110016) and Foundation of "Blue Project" in Jiangsu Province.

Key words: microgrid; distribution network; smart grid; reliability analysis

附录 A IEEE RBTS-Bus 6



N/A 表示无备用电源,可以用断路器在通与断 2 种状态间切换;b 表示断路器;LP 表示负荷

图 A1 IEEE RBTS-Bus 6 母线系统图

Fig.A1 IEEE RBTS-Bus 6 system

每个负荷点逐一加入微电网后的整个配电网可靠性参数如下。

表 A1 系统右半部分计算结果（所带微电网容量为 2.5MW，失效率 P_M 为 0.3）

Tab.A1 Results of the right part of system

负荷	SAIFI(次/(户·年))	SAIDI(h/(户·年))	CAIDI(h/(户·年))	ASAI	EENS((MW·h)/年)
右半系统 原可靠性	0.33703	0.99088	2.94000	0.9998	5.5024
1	0.31968	0.95421	2.98492	0.9999	5.41962
2	0.32053	0.94629	2.95225	0.9999	5.39011
3	0.31914	0.93221	2.92100	0.9999	5.36995
4	0.32119	0.92996	2.89539	0.9999	5.34897
5	0.32173	0.92419	2.87254	0.9999	5.28785
6	0.32219	0.91004	2.82453	0.9999	5.24233
7	0.31625	0.94953	3.00239	0.9999	5.42050
8	0.31607	0.93715	2.96501	0.9999	5.39597
9	0.31735	0.93185	2.93633	0.9999	5.36914
10	0.31683	0.92266	2.91217	0.9999	5.36723
11	0.31923	0.91951	2.88042	0.9999	5.32266
12	0.31889	0.90586	2.84064	0.9999	5.27814
13	0.31838	0.90509	2.84280	0.9999	5.27602
14	0.33612	0.98858	2.94112	0.9999	5.31220
15	0.33694	0.99055	2.93989	0.9999	4.54406
16	0.33693	0.99048	2.93969	0.9999	4.86591
17	0.33612	0.98635	2.93449	0.9999	5.12840

表 A2 左半部分系统计算结果（所带微电网容量为 2.5MW）

Tab.A2 Results of the left part of system

负荷	SAIFI(次/(户·年))	SAIDI(h/(户·年))	CAIDI(h/(户·年))	ASAI	EENS((MW·h)/年)
左半系统 原可靠性	1.29501	8.69972	6.71746	0.9990	42.1690
18	1.20106	8.25839	6.87591	0.9991	41.5798
19	1.21449	8.32144	6.85177	0.9991	41.5269
20	1.29445	8.69672	6.71846	0.9990	41.2807
21	1.29445	8.69672	6.71846	0.9990	41.2338
22	1.21066	8.30342	6.85861	0.9990	41.2076
23	1.19866	8.23918	6.87365	0.9991	41.5541
24	1.29443	8.69655	6.71844	0.9990	41.0242
25	1.24456	8.29546	6.66539	0.9990	41.2283
26	1.29443	8.69447	6.71681	0.9990	40.4115
27	0.94456	8.31082	8.79857	0.9991	41.2095
28	1.25900	7.69190	6.10954	0.9991	38.0170
29	1.25900	7.69498	6.11200	0.9991	38.0132
30	1.25900	7.77212	6.17326	0.9991	37.9018
31	1.21596	7.71295	6.34310	0.9991	37.2047
32	1.29401	7.98856	6.17322	0.9991	37.0081
33	1.21896	7.72356	6.33617	0.9991	37.2047
34	1.29401	7.98874	6.17326	0.9991	37.2047
35	1.29401	7.98874	6.17326	0.9991	37.2047
36	1.21682	7.71983	6.34427	0.9991	37.2207
37	1.29408	7.98866	6.17324	0.9991	37.0304
38	1.29410	7.98882	6.17327	0.9991	37.2207
39	1.21980	7.73018	6.33730	0.9991	37.2207
40	1.29410	7.08882	6.17327	0.9991	37.2207