

含分布式电源的复杂配电网故障恢复

孙洁¹, 王增平¹, 王英男², 潘玉美¹, 郑涛¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206; 2. 沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110811)

摘要: 考虑到实际配电网复杂多变及负荷等量测数据大量缺乏, 建立基于等效负荷的配电网简化模型, 减小了计算时间, 并可以反映配电网的潮流分布。提出了一种针对含分布式电源的复杂配电网故障恢复方案, 当配电网发生故障引起大面积停电时, 首先在已知分布式电源容量的情况下确定各孤岛系统的最佳供电范围, 转入孤岛运行模式以保证重要负荷的持续供电, 然后依据启发式规则对剩余失电网络进行供电恢复并利用改进支路交换法对恢复后的网络进行重构优化, 使得失电负荷和网络损失都尽可能少。算例表明, 提出的方案能够有效地解决含分布式电源的配电网故障恢复问题。

关键词: 配电网; 故障恢复; 分布式电源; 孤岛划分; 支路交换算法

Service restoration of complex distribution system with distributed generation

SUN Jie¹, WANG Zeng-ping¹, WANG Ying-nan², PAN Yu-mei¹, ZHENG Tao¹

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Shenyang Power Supply Company, Shenyang 110811, China)

Abstract: Taking into account the complex and the lack of load data of actual distribution system, this paper establishes a simplified model of distribution network based on the equivalent load which can reduce the calculation time and reflect the flow distribution of the distribution network. A service restoration program for complex distribution system with distributed generation is proposed. When serious failures result in large area power blackout, the best supply area of the island is determined when the distributed power supply capacity is known and DG switches to the islanding operation mode to maintain the power supply for the important load. Then the remaining network loss of power is restored based on heuristic rules and optimized with the improved branch-exchange algorithm to make the loss of power load and network loss as little as possible. At last, the simulation results of the example show that the method can effectively solve the problem of distribution network service restoration.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050208).

Key words: distribution network; service restoration; distributed generation; island partitioning; branch-exchange algorithm

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0056-07

0 引言

我国配电网正常运行时呈辐射状, 当配电网发生故障后, 根据 FTU 上传的信息, 判断出故障区域^[1], 并采取相应的措施对故障进行隔离, 会使某一非故障区域与主网断开而形成失电区。因此, 需要采取有效的故障恢复策略对失电区进行供电恢复, 以缩短停电时间, 减少停电损失。

随着智能电网的兴起, 分布式发电技术也被引

入了电力系统。目前, 分布式电源 (Distributed Generation, DG) 多以接入配电网运行为主, 当配电网出现故障并进行了隔离之后, 失电区内的分布式电源与主网分离, 对该区域内的负荷独立供电, 形成了孤岛运行模式^[2]。利用孤岛效应可以保障配电网故障后重要负荷的供电, 从而提高了供电可靠性。目前, 对于配电网故障恢复的相关研究有很多^[3-5], 但是, DG 孤岛的形成, 使传统配电网供电恢复算法不再符合新的要求, 因此, 需要研究专门针对含分布式电源的复杂配电网故障恢复方法^[6]。

考虑到实际配电网规模庞大复杂及负荷的量测数据大量缺乏的情况, 对配电网进行简化建模, 不仅可以反映故障恢复后配电网的潮流分布, 而且大

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2012AA050208); 国家电网公司科技项目资助 (沈阳供电公司信息化工作办公室 KJ [2013] 1052)

大减小了计算时间, 提高了搜索效率。根据配电网简化模型进行故障恢复, 首先按负荷重要等级进行 DG 孤岛划分, 尽量保证对重要负荷的供电; 然后对剩余尚未恢复供电的负荷, 依据启发式规则并入主网以尽量减少失电负荷, 同时应用改进支路交换法进行网络优化, 使网损尽可能少, 综合上述开关操作方案得到最佳故障恢复策略。

1 复杂配电网简化建模

实际配电网节点和支路众多, 网络规模庞大。目前, 大部分配电网仅在部分线路及公用配电变压器负荷侧配置有远方终端测量装置 (FTU), 这使得在采用配电网的严格模型进行故障恢复的分析与计算时面临着数据大量缺乏等困难, 因此需要对配电网进行简化建模^[7]。

通常可以在配电网的分段开关及联络开关上同杆安装 FTU, 如图 1 所示, 分段开关及联络开关处的 FTU 可以得到准确的测量数据, 如分段开关处的电压、功率等, 而实际沿线的负荷分布无法精确测量。

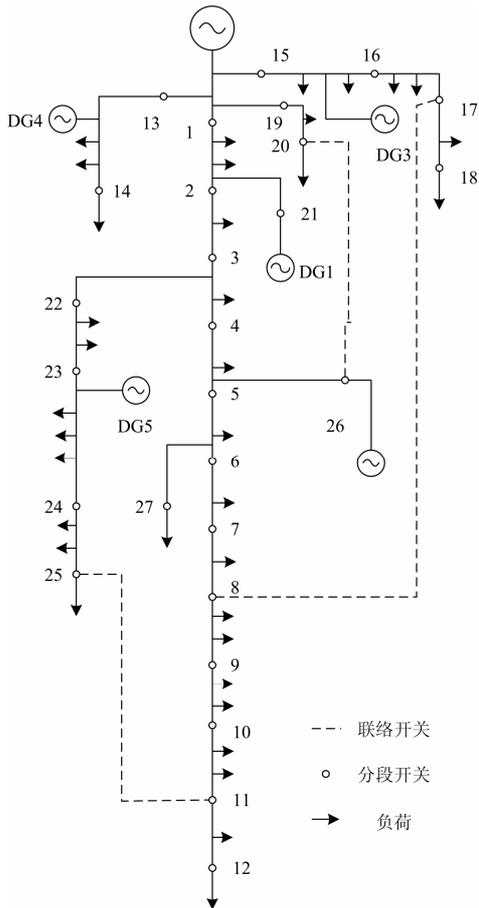


图 1 某实际配电系统

Fig. 1 A real distribution system

根据 FTU 上传的电压及功率即可求出基于等效负荷的简化模型, 其基本原理如下。

图 2 中, 配电网馈线的总长度为 L , 单位 km; A 和 B 为分段开关, 其上装有 FTU, 可测得 A 和 B 的电压 \dot{U}_A 和 \dot{U}_B , 单位 kV, 以及功率 $\dot{S}_A = P_A + jQ_A$ 和 $\dot{S}_B = P_B + jQ_B$, 单位 kVA; $z = r + jx$ 为单位长度的阻抗, 单位 Ω/km 。由于仅在 A 和 B 处装有 FTU, 因此馈线段沿线负荷 $\dot{S}_1 = P_1 + jQ_1$ 、 $\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2$ 、 $\dot{S}_3 = P_3 + jQ_3$ 无法量测到, 可根据 A 和 B 上 FTU 上传的测量信息求解出等效负荷及其位置, 得到如图 3 所示的简化模型。

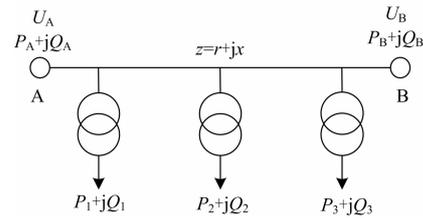


图 2 配电网馈线的严格模型

Fig. 2 Strict model of distribution network feeder

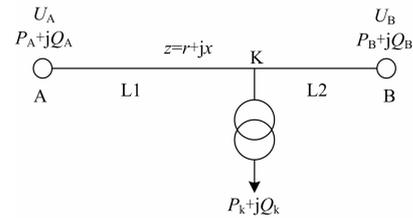


图 3 配电网馈线的简化模型

Fig. 3 Simplified model of distribution network feeder

根据图 3, 由 A 和 B 处量测信息, 可分别由式 (1)、式 (2) 计算出等效负荷处的电压幅值。

$$U_k = \sqrt{\left[U_A - \frac{P_A r L_1 + Q_A x L_1}{U_A} \right]^2 + \left[\frac{P_A x L_1 - Q_A r L_1}{U_A} \right]^2} \quad (1)$$

$$U_k = \sqrt{\left[U_B + \frac{P_B r L_2 + Q_B x L_2}{U_B} \right]^2 + \left[\frac{P_B x L_2 - Q_B r L_2}{U_B} \right]^2} \quad (2)$$

$$L_1 + L_2 = L \quad (3)$$

采用迭代求解出 L_1 的值。令 $dU = U_k - U'_k$, 当 $|dU|$ 小于设定阈值时, 认为迭代收敛; 否则, 若 $dU < 0$, 则适当增大 L_1 的值, 继续迭代, 若 $dU > 0$, 则适当减小 L_1 的值, 继续下次迭代。

以图 1 中, 馈线段 16-18 为例, 通过上述方法, 可得到该馈线的简化模型如图 4 所示。

图 4 中, 馈线段 16-17 长度为 21.69 km, 得到的等效负荷 (16) 所在位置距分段开关 16 长度 l_1 为

8.35 km; 馈线段 17-18 长度为 18.72 km, 等效负荷 (17) 所在位置距分段开关 17 长度 l_3 为 6.86 km。

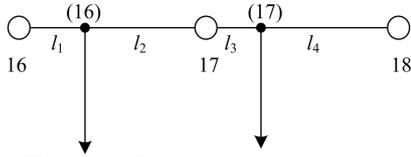


图 4 馈线段 16-18 的等效负荷模型

Fig. 4 Equivalent load model of feeder section 16-18

2 相关术语说明

2.1 开关节点和负荷节点

本文将配电网中相关节点分为开关节点和负荷节点两类。开关节点为分段开关及联络开关等效的节点, 负荷节点为通过配电网简化建模等效出的负荷所在位置, 如图 4 中, 16、17、18 为开关节点, (16)、(17) 为负荷节点。

开关所带负荷即打开开关会导致该负荷中断供电, 如图 4 中, 假如潮流流向从开关节点 16 到开关节点 18, 则负荷 (16) 为开关 16 所带负荷, 负荷 (17) 为开关 17 所带负荷。

2.2 负荷等级

电力负荷根据其对供电可靠性的要求及中断供电在政治、经济上所造成的损失或影响的程度可分为一级、二级及三级负荷。

一级负荷为中断供电会造成人身伤亡、政治及经济重大损失等的负荷; 二级负荷为中断供电会在政治、经济上造成较大损失或影响重要用电单位正常工作的负荷; 不属于一级和二级的负荷为三级负荷。

2.3 无分支供电路径

为方便叙述, 本文提出了无分支供电路径, 即供电路径上没有分支, 按照潮流方向, 每个节点上只有一条电流流入的支路和一条电流流出的支路相连。

2.4 联络开关备用容量

在进行供电恢复时, 需要确定各联络开关的备用容量 S_c , 计算方法为

$$S_c = \min(S_b^{\max} - S_b^{bf}), b \in B_s \quad (4)$$

式中: S_b^{bf} 为故障恢复前第 b 条支路通过的潮流; S_b^{\max} 第 b 条支路的额定容量; B_s 为联络开关到源点之间的支路集合。

3 DG 动态孤岛划分

3.1 孤岛划分的原则

配电网故障后的孤岛划分方案应根据故障隔离

结果及当前配电网的运行情况动态生成, 在确定孤岛方案时, 主要考虑以下原则^[8]:

(1) 孤岛内包含的负荷总量尽可能大, 并且孤岛内总负荷及总损耗之和不超过 DG 的发电容量;

(2) 在进行孤岛划分时, 优先包含较重要的负荷。

3.2 孤岛划分的数学模型

3.2.1 目标函数

考虑到上述孤岛划分的原则, 以孤岛内所有负荷与其重要等级乘积的加权和最大建立目标函数如式 (5)。

$$f = \max \sum_{k \in N_i} x_k \lambda_k P_{L,k} \quad (5)$$

式中: k 为开关节点编号; N_i 为第 i 个孤岛内所有开关节点的集合; x_k 为开关节点状态, 取值为 1 代表该开关闭合, 即该开关节点所带负荷投入, 取值为 0 代表打开, 即该开关节点所带负荷不投入; $P_{L,k}$ 为开关节点所带负荷; λ_k 为开关节点 k 所带负荷的重要等级, 可根据实际情况取值, 例如, 本文算例中将一级负荷的 λ_k 取为 1.0, 二级负荷的 λ_k 取为 0.5, 三级负荷的 λ_k 取为 0.1。

3.2.2 约束条件

(1) 孤岛容量约束, 即各个孤岛内的总负荷及总损耗之和不能超过该孤岛内所有 DG 的发电容量;

(2) 节点电压约束, 即节点电压应保持在允许电压范围内, 介于最大值与最小值之间;

(3) 支路功率约束, 即支路功率不应超过其最大允许功率;

(4) 连通性约束, 即孤岛内至少有一个 DG, 且其内部各负荷节点与 DG 间有连通路经。

3.3 DG 动态孤岛划分方法

以图 5 为例说明本文的动态孤岛划分方法, 图 5 中 DG 的容量为 500 kW, 连通区域内各负荷情况见表 1。

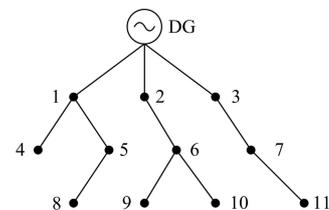


图 5 含 DG 的连通区域

Fig. 5 Connectivity area with DG

表 1 连通区域内各负荷基本信息

Table 1 Basic information of each load in connectivity area

节点编号	负荷量/kW	负荷等级
1	180	2
2	100	1
3	150	2
4	310	3
5	150	1
6	200	1
7	320	1
8	60	2
9	170	3
10	90	3
11	70	3

(1) 在进行孤岛划分前, 首先确定配网各节点负荷等级, 以及 DG 在各无分支供电路径上的最大供电范围, 以缩小搜索空间。图 5 中各负荷的等级列于表 1, 该 DG 在各无分支供电路径上的最大供电范围如表 2 所示, 负荷节点 11 在供电路径 5 上, 但是加上该节点负荷, 会超过 DG 容量限制, 因此, 可直接将该节点剔除, 从而使搜索空间变小。

表 2 DG 在各无分支供电路径上的最大供电范围

Table 2 The maximum power supply range of DG in each non-branch power supply routine

无分支供电路径 编号	供电路径上负荷节点 点编号	总负荷量/kW
1	1, 4	490
2	1, 5, 8	390
3	2, 6, 9	470
4	2, 6, 10	390
5	3, 7	470

(2) 根据故障隔离结果, 确定失电区, 找出失电区内包含 DG 的连通区域, 进一步缩小孤岛划分的范围, 提高搜索效率。本文假设图 5 所示连通区域均在失电区域内, 如果不在失电区, 仅需将其从表 2 中相应供电路径中去掉, 再进行下一步的孤岛划分。

(3) 节点分层, 与 DG 直接相连的负荷节点为第一层, 与第一层节点直接相连的负荷点为第二层节点, 依此类推, 并且计算各负荷点的 λP_L 的值, 各层节点按 λP_L 降序排列。本例结果列于表 3 中。

(4) 从 DG 出发, 访问所有第一层负荷点, 在满足约束条件的前提下, 找出使 λP_L 的和最大的节点, 存入孤岛负荷节点集合中, 继续访问下一层节

点, 找出与孤岛负荷节点集合中相连的负荷节点, 在满足约束条件的前提下, 用 λP_L 值较大的负荷节点代替上一层 λP_L 值较小的负荷节点, 按上述方法, 直至搜索到最后一层节点, 即可得出最佳孤岛划分方案。其中, 校验方案是否满足约束条件的方法如下: 首先判断连入孤岛的负荷总和是否超过 DG 容量, 即要满足容量约束, 然后校验其连通性约束, 最后针对方案对应的孤岛进行潮流计算求出各节点电压及各支路功率, 判断是否满足节点电压约束和支路功率约束。

表 3 节点分层结果

Table 3 Results of node delamination

节点所在层	节点编号	λP_L
1	2, 1, 3	100, 90, 75
2	7, 6, 5, 4	320, 200, 150, 30
3	8, 10, 9	30, 9, 7

本例最终得到的孤岛划分方案为: 1, 2, 6。

4 含 DG 的配电网故障恢复

4.1 故障恢复的目标及约束

孤岛划分方案确定后, 需要对失电区剩余未恢复供电的负荷继续进行优化恢复, 恢复的首要目标是使失电负荷量尽可能少, 在此基础上选择有功网损较少的方案。

(1) 失电负荷量尽可能少

$$\min L_{out} = k_1 \sum l_{out1} + k_2 \sum l_{out2} + k_3 \sum l_{out3} \quad (6)$$

式中: L_{out} 为失电负荷量; k_1, k_2, k_3 分别为一、二、三级负荷供电中断的等效惩罚系数, 可根据实际需要取值, 例如, 本文算例中取 $k_1 = 2, k_2 = 1, k_3 = 0.5$; $l_{out1}, l_{out2}, l_{out3}$ 分别为未恢复的一、二、三级负荷。

(2) 有功网损

$$\min P_{loss} = \sum_{b=1}^n I_b^2 r_b \quad (7)$$

式中: P_{loss} 为网络的有功网损; b 为支路编号; I_b 为流过支路 b 的电流; r_b 为支路 b 的电阻。

形成的故障恢复方案要满足以下约束条件:

(1) 节点电压约束

$$U_{k, \min} \leq U_k \leq U_{k, \max} \quad (8)$$

式中: U_k 为节点 k 的电压; $U_{k, \max}, U_{k, \min}$ 分别为节点 k 电压的上、下限。

(2) 支路容量约束

$$S_b \leq S_{b, \max} \quad (9)$$

式中: S_b 为支路 b 的功率; $S_{b, \max}$ 为支路 b 额定容量。

(3) 辐射状运行的网络约束, 即恢复方案所形

成网络结构必须满足辐射状的要求。

4.2 失电区剩余网络供电恢复及优化

4.2.1 失电区剩余网络供电恢复

对于失电区剩余网络首先按照启发式算法进行供电恢复,以使失电负荷量尽可能少。按启发式规则优先选择靠近电源端和容量裕度大的联络开关进行恢复,具体步骤如下:

(1) 对失电区剩余网络进行分析,统计各失电负荷大小及负荷等级。

(2) 统计连接带电区与失电区的联络开关,并按式(4)计算各联络开关的备用容量。

(3) 按照启发式规则选择需要闭合的一个联络开关。

(4) 对步骤(3)形成的主网进行潮流计算,校验当前状态是否满足约束条件。若满足,则供电恢复结束;若不满足,则从线路末端开始向前搜索,断开相应的分段开关,直至满足约束条件。

(5) 统计尚未恢复供电的负荷,继续进行步骤

(2)~(4),直至所有失电负荷都恢复或者没有可以闭合的联络开关,输出供电恢复方案和相应的失电负荷量。

4.2.2 供电恢复后的网络优化

供电恢复后的网络优化即为以网损最小为目标,对由供电恢复方案形成的配电网结构进行网络重构的问题。支路交换法利用启发式规则减少需要考虑的开关组合,并通过公式计算开关操作引起的网损变化,可以快速确定降低网损的配网结构,是配电网网络重构的有效算法之一。本文采用文献[9]提出的改进支路交换法进行网络重构,以提高搜索效率。

支路交换法即闭合一个联络开关,形成了环路,选择环路中使网损降低较多的分段开关,将其打开,称为一次拓扑调整。文献[7]对其进行改进,闭合节点 m 和 n 间的联络开关,并将环路中的一个分段开关打开,引起的有功网损变化 ΔP 为

$$\Delta P = 2 \times \left[\sum_{i \in D} I_i \operatorname{Re} \left[(\dot{U}_m - \dot{U}_n)^* \right] + R_{\text{loop}} \left(\sum_{i \in D} I_i \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中: I_i 为节点 i 的负荷; D 为发生负荷转移的节点集合; \dot{U}_m, \dot{U}_n 分别为电源点到节点 m 、 n 的电压降落; R_{loop} 为合上联络开关形成环网的环路电阻。

对式(10)进行分析简化,得到理想转移负荷 I_{opt} 为

$$I_{\text{opt}} = \frac{U_n - U_m}{R_{\text{loop}}} \quad (11)$$

对于某一次拓扑调整,合上联络开关,打开转移负荷最接近 I_{opt} 的分段开关,可以产生最佳的降损效果。

合上的几个联络开关形成的环网之间没有公共支路,它们对应的拓扑调整称为独立拓扑调整,每次迭代时,实施当前网络拓扑下所有的独立拓扑调整,并进行潮流计算校验支路容量约束和节点电压约束,经过多次迭代,直至网损减小量大于设定阈值的所有联络开关都执行过拓扑调整为止,合并几次迭代的开关调整,形成网络优化方案。

综合供电恢复方案与网络优化方案,即可得到主网故障恢复方案。

4.3 含 DG 的配电网故障恢复流程

(1) 数据准备。获得配电网基本电气信息,如网络拓扑信息,各 DG 的位置及容量,FTU 上传的电压、电流及功率,故障处理信息和失电区、带电区及故障区的范围等。

(2) 建立基于等效负荷的配电网简化模型。对于带电区网络按照 FTU 实时上传的数据进行建模,对于失电区网络,按照故障前 FTU 上传的数据建立近似模型,并确定各开关节点所带负荷,并对简化模型中的各负荷节点编号。

(3) 查找失电区是否有 DG,如果有 DG,则按照本文所述的孤岛划分方法进行孤岛划分,再进行步骤(4),如果没有 DG,则直接进行步骤(4)。

(4) 对失电区尚未恢复供电的负荷,按照启发式规则通过联络开关将其接入主网,以尽量使失电负荷最少,输出供电恢复方案。

(5) 采用改进支路交换法对故障恢复后的网络进行优化重构,使得网络损耗尽可能少,输出网络优化方案。

(6) 综合步骤(2)~(5)中联络开关及分段开关动作情况,即根据孤岛划分结果、供电恢复方案及网络优化方案,得出最终故障恢复优化方案。

5 算例分析

针对本文所提出的故障恢复方案,首先对孤岛划分进行了比较验证其实用性,然后对本文含孤岛运行的故障恢复方案进行了仿真验证。

5.1 孤岛划分方案的有效性验证

为验证本文孤岛划分方案的有效性,分别采用本文考虑负荷重要等级的孤岛划分方法和仅考虑负荷容量的孤岛划分方法对图 5 所示的含 DG 的连通区域进行孤岛划分,并对其结果进行比较。

由本文所述方法得到的孤岛包含的负荷节点为 1、2、6,其中 2、6 为一级负荷,1 为二级负荷,

DG 所带负荷量为 480 kW, 目标函数值为 390 kW; 若仅考虑孤岛中所含负荷量的大小, 则孤岛中所包含的负荷节点为 1、4, 其中 1 为 2 级负荷, 4 为三级负荷, DG 所带负荷为 490 kW, 采用本文的目标函数衡量, 其值仅为 121 kW, 具体对比见表 4。

表 4 孤岛划分对比

Table 4 Comparison of island division

	孤岛所含负荷情况			总负荷量/kW
	节点编号	负荷等级	负荷量/kW	
考虑负荷等级	1	2	180	480
	2	1	100	
	6	1	200	
仅考虑孤岛所带负荷最大	1	2	180	490
	4	3	310	

可见, 尽管仅考虑负荷量大小而进行孤岛划分会使孤岛所带负荷较多, 但是如果忽略负荷重要等级, 会导致很多重要负荷供电得不到保障, 可能会导致严重后果。

5.2 整体故障恢复方案仿真

采用图 1 所示测试系统, DG 参数见表 5, 线路单位长度阻抗为 $0.0787+j0.405 \Omega$, 各馈线段长度, FTU 上传数据及各负荷等级等如有需要可联系作者。假设馈线段 1-2 发生故障, 则断开分段开关 1 和 2 将故障隔离。

建立针对图 1 的基于等效负荷的简化模型, 如图 6 所示, 其中 1~27 为开关节点编号, (1)~(27) 为负荷节点编号。在此基础上, 采用本文所述方法进行孤岛划分, 并对剩余网络进行供电恢复及优化, 得到故障恢复方案。

表 5 DG 参数

Table 5 DG parameters

DG	容量/kW	功率因数
1	300	0.8
2	400	0.9
3	200	0.8
4	800	0.8
5	250	0.7

采用本文方法可得到图 6 中所示的孤岛划分方案, 包括 3 个孤岛: 孤岛 1 为断开分段开关 2 后形成, 由 DG1 供电; 孤岛 2 为断开分段开关 2、6 和 22 形成, 由 DG2 供电; 孤岛 3 为断开分段开关 22 后形成, 由 DG5 供电。剩余负荷则通过闭合联络开

关 8-17 并入主网供电, 此时, 失电负荷量为 0, 总网损为 100.19 kW。综上, 可得出该算例的故障恢复方案为: 断开分段开关 6、22, 闭合联络开关 8-17。可见, 本文提出的故障恢复策略可以充分利用 DG 的发电能力, 实现配电网故障后快速恢复, 保障重要负荷的持续供电, 提供配电网经济运行能力。

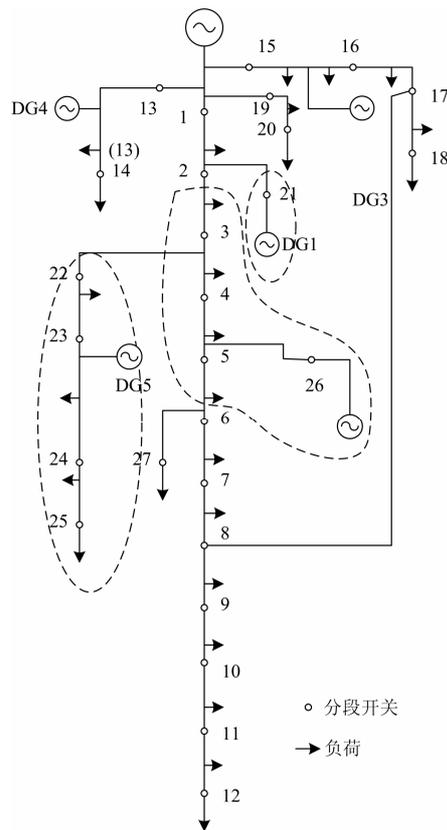


图 6 配网简化模型及孤岛划分方案

Fig. 6 Simplified model of distribution network and island division program

6 结论

本文提出了一种针对含有 DG 的复杂配电网故障恢复算法。首先, 考虑到实际配电网负荷等量测量数据大量缺乏的情况, 建立基于等效负荷的简化模型, 减小了故障恢复过程中的计算量, 并能反映故障恢复后的潮流分布; 其次对于失电区的恢复, 先进行孤岛划分, 尽量保证重要负荷的持续供电, 并对剩余网络进行供电恢复及优化, 得到最终故障恢复方案; 最后通过实际算例验证了本文提出的方案可以有效地解决实际配电网的故障恢复问题, 具有一定的工程价值。

参考文献

[1] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的

- 链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 191-196.
- WENG Lan-tian, LIU Kai-pei, LIU Xiao-li, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 191-196.
- [2] 赵晶晶, 杨秀, 符杨. 考虑分布式发电孤岛运行方式的智能配电网供电恢复策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 45-49.
- ZHAO Jing-jing, YANG Xiu, FU Yang. Smart distribution system service restoration using distributed generation islanding technique[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 45-49.
- [3] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 148-154.
- LIU Li, CHEN Xue-feng, ZHAI Deng-hui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 148-154.
- [4] 巩伟峥, 房鑫炎. 基于混合编码方式的配电网故障恢复算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 104-108.
- GONG Wei-zheng, FANG Xin-yan. Research of distribution system service restoration algorithm based on hybrid encoding[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 104-108.
- [5] 张浩, 和敬涵, 薄志谦, 等. 基于动态规划算法的故障恢复重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162-167.
- ZHANG Hao, HE Jing-han, BO Zhi-qian, et al. Service restoration based on dynamic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162-167.
- [6] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.
- XU Yu-qin, ZHANG Li, WANG Zeng-ping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.
- [7] 刘健, 毕鹏翔, 杨文字, 等. 配电网理论及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [8] 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 Yu-ping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 50-54.
- [9] 毕鹏翔, 刘健, 张雯元. 配电网网络重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.
- BI Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Wen-yuan. A refined branch-exchange algorithm for distribution networks reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.

收稿日期: 2013-05-10; 修回日期: 2013-07-23

作者简介:

孙洁(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail:wuduwawa312@foxmail.com

王增平(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

王英男(1960-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。