

基于孤岛划分的配电网故障恢复研究

考虑了分布式电源(DG)接入对配电网故障恢复的影响,为了充分利用DG,采取孤岛划分和剩余网络重构的方法作为故障恢复研究的方案。针对故障后孤岛划分建立的多目标多约束模型,将其分解为初始孤岛和孤岛修正两个子模型,同时简化模型,并采用隐枚举法进行求解,经过校验修正得到最终的孤岛划分方案。剩余的网络则采用蚁群算法进行寻优,求出开关的最优组合。通过算例分析验证了该方案的优越性。

迟吉运¹ 韦 钢¹ 李功新² 张嘉堃¹ / 1.上海电力学院 2.福建省电力公司

0 引言

配电网故障恢复,即当系统出现故障时,采取有效的手段来切换线路上分段开关、联络开关的组合状态,以此来达到网络重构的目的。含分布式电源(Distributed Generation, DG)接入的配电网发生故障时,孤岛划分以及剩余网络重构的研究对提高供电可靠性具有重要意义。

在此领域,国内外文献比较专注于研究算法^[1-3],通过搜索供电路径求出一组最佳开关组合方案。随着新能源并网技术日趋成熟,大量DG接入配电系统,因其具有损耗低、可靠性高以及能源种类多等^[4]优势而引起广泛关注。当系统发生故障后,孤岛运行可以充分利用DG的优势,提高配电网运行的可靠性。如何合理、有效地划分孤岛,国内外电力学者进行了深入的研究。文献[5]首先将DG进行分类,并基于传统算法,利用可

作为备用的DG形成孤岛,同时进行故障恢复,该方案工程实用性不高。文献[6]采用一种主动孤岛运行方案,事先规划好的孤岛可能由于孤岛发生时间无法预知,导致规划的孤岛区域发生偏离。文献[7]基于根树层次特性,利用深度优先搜索算法划分孤岛区间,但文中负荷默认为不可控。文献[8]考虑了负荷的可控性和负荷等级,基于启发式思想进行孤岛划分。此恢复方案不仅只能形成一个孤岛,而且规模较大,网损较重。

本文考虑在DG接入对配电网产生影响的情况下,当故障发生后,首先利用DG支撑部分负荷,通过初始孤岛和最终孤岛两阶段求解,使孤岛内恢复负荷容量最大;其次对于剩余的网络结构采用蚁群算法求出有效的开关组合,从而实现故障后含DG接入的配电系统网络恢复;最后通过算例分析证明本文恢复方案的有效性。

1 故障恢复模型建立

1.1 分布式发电潮流计算模型

DG接入配电网后会引发潮流的改变,从而对故障恢复产生影响。根据分布式电源的输出特性,常处理成以下四种模型^[9]:①有功功率和无功功率恒定的PQ模型,如由功率因数控制的热电联产发电机等,常处理成“负负荷”模型;②有功功率和电压恒定的PV模型,如微型燃气轮机等;③有功功率和电流恒定的PI模型,如储能系统等;④有功功率和无功功率随电压变化而变化的P-Q-



迟吉运/硕士研究生

关键词/Keywords

分布式电源·
孤岛划分·
隐枚举法·
蚁群算法·

上海绿色能源并网工程技术研究中心项目
(13DZ2251900)。

V 模型,如异步风机等。在孤岛划分的计算中,对不同的DG模型要采用不同的方法进行处理,本文将其转化成易处理的 PQ 模型,以达到简化计算的目的。进行孤岛划分的DG均位于故障下游的失电网络,对于未失电区域的DG,则不参与孤岛划分。

1.2 孤岛划分模型的建立

1.2.1 目标函数

在含DG接入的配电网发生故障后,首要目标是对各节点的负荷进行最大程度的恢复供电,即

$$f = \max \sum_{i=1}^N c_i x_i P_{Li} \quad (1)$$

式中, N 为孤岛系统节点数; x_i 取值为1或0,当 $x_i=1$ 时,表示节点 i 参与孤岛划分; c_i 为节点 i 的负荷权重,负荷优先等级越高,权重越大。

关于负荷优先等级,本文根据停电损耗可划分成1级、2级和3级负荷,配电网故障后,应当利用DG尽可能多地保障重要负荷供电,同时尽量保证1级负荷持续供电,2级、3级负荷为可切除负荷。

1.2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$P_i + P_{DG_i} = P_{Li} + U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_i + Q_{DG_i} = Q_{Li} + U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3)$$

式中, P_{DG_i} 、 Q_{DG_i} 为接在节点 i 的DG所发出的有功和无功功率; P_{Li} 、 Q_{Li} 为接在节点 i 负荷所消耗的有功和无功功率; G_{ij} 为支路 ij 电导; B_{ij} 为支路 ij 电纳; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 的电压相角差; m 为与节点 i 相联的支路数。

(2) 联通型约束

$$HX \leq 0 \quad (4)$$

式中, H 为功率树 Y “父-子节点”的关联矩阵,存在 $x^F \geq x^S$,其中父节点的状态变量是 x^F ,子节点的状态变量是 x^S ,若此功率树包含两个节点,分别为节点1和节点2,且节点2是节点1的父节点,则 $H = [1 \ -1]$, $X = [x_1 \ x_2]^T$ 。

(3) 辐射型约束

$$N = M + 1 \quad (5)$$

式中, N 为配电系统的节点数; M 为配电系统支路数。

(4) 电压上下限约束

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (6)$$

式中, $U_{i \min}$ 和 $U_{i \max}$ 分别为节点 i 的电压下限和上限。

(5) 支路容量约束

$$S_{ij \min} \leq S_{ij} \leq S_{ij \max} \quad (7)$$

式中, $S_{ij \max}$ 为支路 ij 允许通过的最大容量。

(6) DG功率约束

$$\begin{cases} P_{DG \min} < P_{DG_i} < P_{DG \max} \\ Q_{DG \min} < Q_{DG_i} < Q_{DG \max} \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{DG_i} 、 Q_{DG_i} 为第 i 个DG的有功功率和无功功率。

1.3 剩余网络重构模型的建立

在求得最终的孤岛方案之后,对含有联络开关的剩余支路进行重新编码,以网络损耗最小作为目标函数,其中网损主要指有功网损,构建如下

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{L_r} k_i R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (9)$$

式中, L_r 为剩余支路集合。

约束条件如式(2)~式(8)所示。

2 故障恢复模型求解方法

2.1 基于隐枚举法的孤岛划分

由于孤岛划分问题是一个多目标、多约束的0-1非线性整数规划问题,同时属于NP难题,对此,本文将其划分为初始孤岛和孤岛修正两阶段进行简化求解,具体求解过程如下。

(1) 初始孤岛

为了减少解空间冗余度,同时提高计算效率,在初始孤岛划分的过程中,以DG为根节点建立功率树 Y ,将出力最大的DG作为根节点,其余DG出力设为0,各树枝应满足的表达式为

$$\sum_{i \in Y_k} P_{Li} x_i < P_{DG} \quad (10)$$

式中, Y_k 为与DG相连的第 k 个节点及其子节点的集合; P_{Li} 为与节点 i 相连的负荷量; x_i 取值为1或0,当 $x_i=1$ 时,节点 i 属于集合 Y ,反之,则不属于。

在孤岛划分时要尽可能使切除的负荷总量最少,即

$$f_{\Delta} = \min \sum_{i=1}^N \varepsilon P_{Li} \quad (11)$$

式中, ε 为负荷的可控性比例; εP_{Li} 为在节点 i 处根据 ε 切除的负荷量。

在计及孤岛的功率平衡和切负荷量最小的前提下,结合联通型和辐射型约束条件,确定出该DG的初始孤岛划分方案,其初始的孤岛模型具体如下

$$\begin{aligned} f &= \max \sum_{i=1}^N c_i x_i P_{Li} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum_{i \in Y_k} P_{Li} x_i \leq P_{DG} \\ f_{\Delta} = \min \sum_{i=1}^N \varepsilon P_{Li} \\ P_i + P_{DG_i} = P_{Li} + U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i + Q_{DG_i} = Q_{Li} + U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ HX \leq 0 \\ N = M + 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

由于变量 x_i 取值只能为1或0,属于0-1非线性整数规划问题,因此本文采用具有树状搜索结构的隐枚举法进行求解。隐枚举法^[10]是求解0-1规划问题的常用方法,该方法的特点是只需检验一部分的变量组合,便可隐含求得问题的最优解,减少了枚举的次数,提高了计算的效率。通过隐枚举法求出初始解集 S ,得到孤岛的初始划分方案。

(2) 孤岛修正

本文建立节点电压稳定性指标^[11]对初始孤岛内各节点的电压稳定性进行评估,具体如下

$$L_j = \frac{4[(P_j x_{ij} - Q_j r_{ij})^2 + (P_j r_{ij} + Q_j x_{ij}) U_i^2]}{U_i^4} \quad (13)$$

式中, L_j 为电压稳定指数; r_{ij} 、 x_{ij} 为支路 ij 的电阻和电抗; P_j 、 Q_j 为注入节点 j 的有功和无功功率。

电压稳定指标由支路中 L_j 最大值确定,因此电压稳定指标 L 为

$$L = \max (L_2, L_3, \dots, L_j, \dots, L_N) \quad (14)$$

研究表明,配电网电压稳定的系统,电压稳定指标远小于1.0。当 L 越趋近于0时,则该系统稳定程度越高;当 L 越趋近于1.0时,则该系统稳定程度越低。

对孤岛内部进行潮流计算,结合负荷切除量最小、电压稳定指标 L 以及约束条件式(6)~式(8)、式(14)作为边界量,对初始孤岛进行修正,得到最终的孤岛划分方案,具体过程如下

$$\begin{aligned} f_{\Delta} &= \min \sum_{i=1}^N \varepsilon P_{Li} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} P_G - P_L - P_S \geq 0 \\ U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \\ S_{ij \min} \leq S_{ij} \leq S_{ij \max} \\ P_{DG \min} < P_{DG_i} < P_{DG \max} \\ Q_{DG \min} < Q_{DG_i} < Q_{DG \max} \\ L = \max (L_2, L_3, \dots, L_j, \dots, L_N) \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, P_G 、 P_S 为孤岛DG所发出的有功功率之和与孤岛网损,其余参数如前文所述。

当多个孤岛只有一条支路连接时,可以通过合并进行孤岛简化。

2.2 剩余网络的模型求解

对于建立的剩余网络重构模型,本文采用蚁群算法^[12]进行求解。该算法鲁棒性较强,分布式计算机优良,不易陷入局部最优,在求解复杂的组合优化问题方面应用广泛。蚁群算法利用正反馈机制,当走过最优路径的蚂蚁越多、留下的信息素浓度越大时,其他路径上的信息素就会减少至消失,最终收敛到最优路径上,路径选择的概率是由信息素的浓度和启发信息来决定的。

对初始时刻的开关进行重新编码,从1到 T 时段所有的开关状态构成一条路径,其中网络损耗最小的为最优路径,即为所求的剩余网络重构方案。各条路径上信息素量相等,即初始信息素浓度为常数,蚂蚁 k ($k=1,2,\dots,m$) 在运动过程中根据各条路径上信息素含量决定转移方向。则位于节点 i 的蚂蚁 k 转移到节点 j 的概率为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \tau_{ij}^{\alpha}(t) \eta_{ij}^{\beta}(t) / \sum_{j \in D^k} [\tau_{ij}^{\alpha}(t) \eta_{ij}^{\beta}(t)] & j \in D^k \\ 0 & j \notin D^k \end{cases} \quad (16)$$

式中, D^k 为蚂蚁 k 下一次允许访问的节点集合; α 和 β 为两个参数, 分别反映了蚂蚁运动过程中信息素浓度和启发信息的相对重要性因子; $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻路径 ij 上的信息素浓度, 初始时刻的信息素浓度 $\tau_{ij}(t)=C$ (常数); $\eta_{ij}(t)$ 为路径 ij 上的启发信息, $\eta_{ij}=1/r_{ij}$ 。

为满足蚂蚁必须遍历所有节点形成辐射网络这个约束条件, 应为每只蚂蚁设计一个禁忌表 $\text{Tabu}(k)$ ($k=1,2,\dots,m$), 记录在 t 时刻蚂蚁 k 已经过的节点, 不允许该蚂蚁在本次搜索中重复经过, 本次搜索结束后禁忌表清空。

蚂蚁在完成一次搜索后, 对每条路径上的信息素进行更新, 即

$$\tau_{ij}(t+n)=\rho\tau_{ij}(t)+\sum_{k=1}^m\Delta\tau_{ij}^k(t,t+n) \quad (17)$$

式中, ρ 为信息素残留度系数, $\rho\in[0,1]$; $\Delta\tau_{ij}^k(t,t+n)$ 表示在本次循环中蚂蚁 k 从 t 时刻到 $t+n$ 时刻在路径 ij 上留下的信息素浓度, 其中 $\Delta\tau_{ij}^k=Q/\min P_{\text{loss}}$, Q 为常数, $\min P_{\text{loss}}$ 为本次循环路径中最小的网损。

当蚁群算法的迭代次数达到最大时, 求得的最优结果即为剩余网络重构的方案。

综上所述, 基于孤岛划分的配电网故障恢复主要分为孤岛划分和剩余网络重构两个阶段。第一阶段是将孤岛划分模型分解成初始孤岛和孤岛修正两子模型, 简化目标函数, 提高最优解的搜索效率; 第二阶段采用蚁群算法对剩余网络进行重构, 得到最终含DG接入的配电网故障恢复方案。具体求解流程如图1所示。

3 算例分析

为验证恢复方案的有效性, 本文在PG&E 69节点配电系统的基础上引入了DG, 如图2所示, 原系统的参数可参考文献[13]。其中, DG接入节点出力如表1所示, 负荷的等级和可控类型如表2所示。1级、2级和3级负荷的负荷权重分别取为10、1和0.1。蚁群算法的参数设置如下: $m=30$; $\alpha=2.0$; $\beta=0.5$; $\rho=0.7$; $Q=200$; $\tau(0)=1.0$; 令最大迭代次数为 I_{max} , 本文 $I_{\text{max}}=100$ 。假设线路3~4处

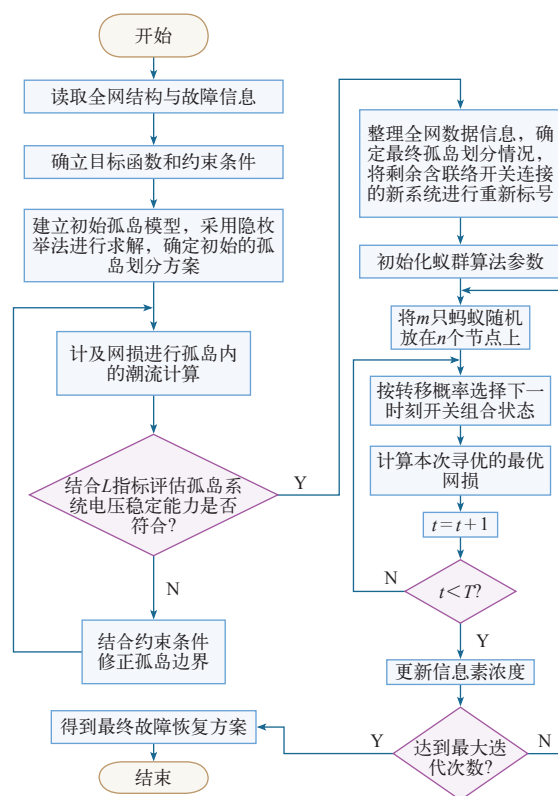


图1 方案求解流程

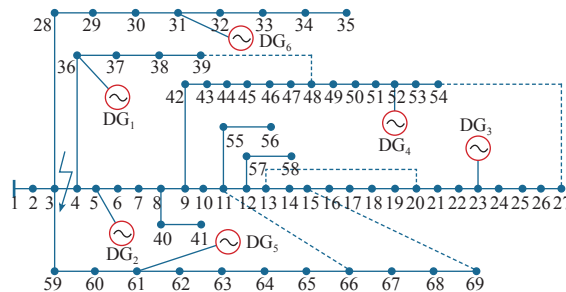


图2 含分布式发电的69节点配电系统

发生了永久性故障, 使故障下游的系统失去供电。

表1 接入点与DG出力

DG接入节点	有功功率/kW	功率因数
5	50	0.85
23	450	0.85
31	150	0.9
36	250	0.9
52	1 300	0.85
61	200	0.9

利用本文所述的故障恢复方案进行故障下游系统恢复, 首先要进行孤岛划分, 具体过程如下。

表2 负荷的等级和可控类型

1级负荷	3级负荷	2级负荷	可控	不可控
6、9、12	7、10、11		11、13、26、27	
18、35	13、16、22		28、34、35	
37、42	28、43	其余节点	39~41、43、44	其余节点
51、57、62	45~48		48、53~58	
	59、60、63		66-69	

(1) 初始孤岛

1) 以最大输出功率 DG_4 为根节点, 形成故障下游系统的功率树模型 Y_1 , 其余 $DG_1 \sim DG_3$ 这三个DG节点的权重和出力都为0, 节点集合 $\{4,5,15,19,23,25,36,45 \sim 47,49,52\}$ 各节点的负荷功率也都为0, 根据简化计算思想, 可以与其父节点进行合并, 得到简化的等效树模型。根据数学思想初始孤岛模型, 采用隐枚举法进行计算, 得到包括 DG_4 和负荷节点 $\{50 \sim 52\}$ 在内的孤岛A1。

2) 将A1简化成一个新的DG节点S1, S1的剩余功率为24 kW, 将A1进行简化后的系统功率树如图3所示。

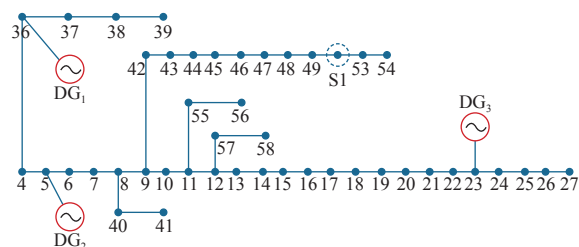


图3 简化后含S1系统功率树

3) 同理, 依次以 DG_3 、 DG_1 和 DG_2 为根节点进行相应计算, 得到相应的孤岛A2、A3和A4, 分别对其简化形成新的DG节点S2、S3和S4。简化后的系统功率树如图4所示。

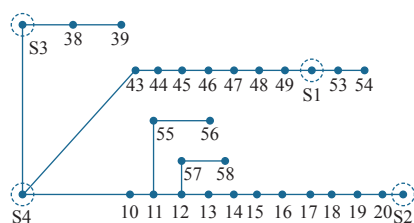


图4 简化后含S1、S2、S3和S4系统功率树

(2) 孤岛修正

1) 因为S3、S4只有一条支路连接, 可以进行

合并形成新的DG节点S5, 合并后的功率树如图5所示。

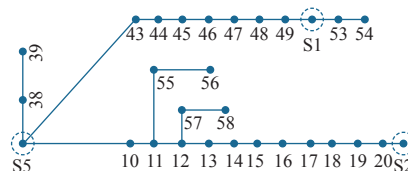


图5 简化后含S1、S2和S5系统功率树

2) 在初始的划分方案中, S1剩余功率为24 kW, S2剩余功率为18.5 kW, S5剩余功率为24.55 kW, 结合负荷的优先级和可控性, 使切除的负荷量最少, 计及线路损耗, 修正孤岛边界, 同时结合 L 指标进行潮流计算, 在校验评估修正之后, 得到最终的孤岛划分方案如图6所示。

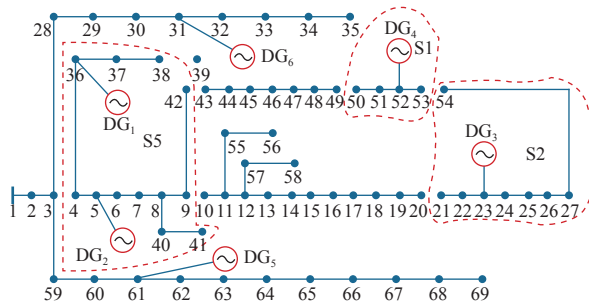


图6 含DG配电系统最优孤岛划分方案

(3) 剩余网络重构

孤岛划分完成后对剩余网络开关状态进行重新编码, 以网络损耗最小为目标, 满足前文所述约束式(2)~式(8), 同时采用蚁群算法进行求解最优供电路径。采用蚁群算法求得目标函数的变化如图7所示。从第2次迭代计算开始对目标函数进行收敛, 在迭代次数 $I=23$ 时, 数值不再变化, 各条支路上的信息素不再进行更新, 因此目

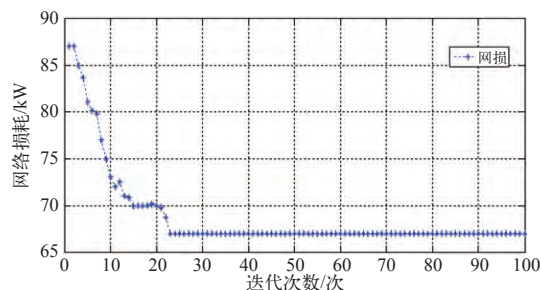


图7 蚁群算法求得目标函数的变化

标函数找到最优解。

结合含DG配电系统的最优孤岛方案，本文求得的最优故障恢复方案如图8所示。

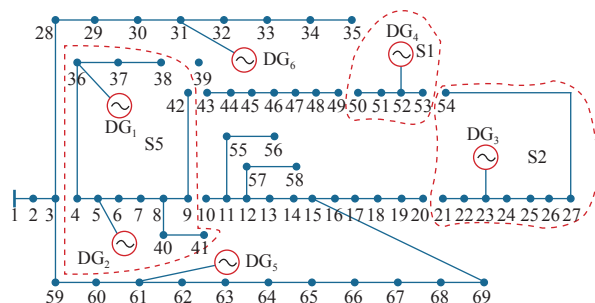


图8 含DG配电系统故障恢复方案

在本文计算所得图8的故障恢复方案中，为保证孤岛系统正常运行，需要切除部分负荷，因切除负荷量较少（为13.5 kW），重要负荷如{6,9,12,18,37,42,51,57}得到供电恢复，故大部分受故障影响的负荷得到了供电恢复，负荷恢复总量为2 103.5 kW，孤岛网损总量为7.031 kW，孤岛S1、S2和S5电压稳定指标分别为0.071、0.089和0.132，均接近于0，因此，表明该划分的孤岛运行系统电压比较稳定。

为便于比较，本文分别采用文献[7]和文献[8]所述的孤岛划分方法对图2所示的系统进行孤岛划分，分别得到的孤岛划分方案如图9、图10所示。

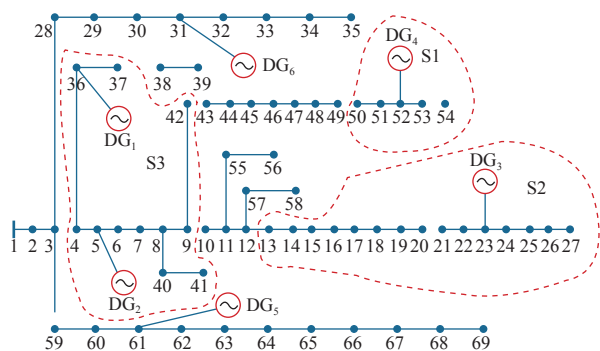


图9 文献[7]方法得到的孤岛划分方案

将上述三种故障恢复方案进行分析对比，结果如表3所示。

由表3可见，文献[7]算法恢复各项指标都偏低，主要原因在于系统中节点50的功率需求为1 244 kW，导致DG₄的剩余功率无法满足，因此得

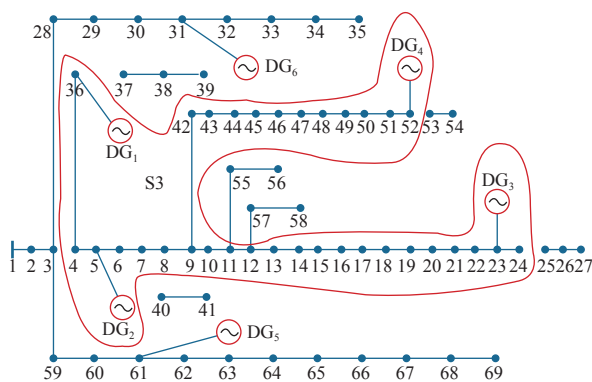


图10 文献[8]方法得到的孤岛划分方案

表3 孤岛方案比较

指标	本文	文献[7]	文献[8]
恢复负荷量/kW	2 103.5	1 151.25	1 983.5
切除负荷量/kW	13.5	43.5	26.7
恢复的1级负荷/1级负荷总量	100	50.8	97.1
孤岛网损总量/kW	7.031	13.093	9.037

不到充分利用。而且此方案只恢复了重要负荷{6, 9, 18, 37, 42, 51}的供电。文献[8]算法只形成了一个孤岛，恢复负荷总量较低，网损较重，且部分1级负荷也被切除。原因在于本算例中各DG相距较远，孤岛规模较大，损耗也随之增大，用于供电恢复的电能随之减少。

上述算例计算结果表明，含DG接入的配电网发生故障时，采用本文的方法可以使故障更好地得到恢复。

4 结束语

本文提出基于孤岛划分的配电网故障恢复研究，采取孤岛划分和剩余网络重构方法作为故障恢复的方案，此方案具有以下优势：

1) 为了解决孤岛划分中多目标、多约束问题，本文将其转化为初始孤岛和孤岛修正两个阶段进行，精简了孤岛模型，减少了解的搜索范围，使求解的目标函数最优化。

2) 隐枚举法是求解0-1混合型整数规划模型常用算法；蚁群算法具有很好的鲁棒性，在解决组合优化问题中得到了广泛的应用。这两种算法的采用提高了模型求解的计算准确度和效率。

3) 计及了负荷的优先级、可控性以及功率

平衡、联通型等多种约束条件,构造的模型和求解算法比较符合含DG的配电网工程实际现状,且能最大程度地恢复重要负荷供电,减少负荷切除量。

当今,DG大量接入配电网,为了充分利用DG,最大程度恢复各节点负荷的电力供应,配电网中孤岛运行必将成为一种重要的运行方式,因此本文的恢复方案在含DG接入的配电网故障恢复的工程实际应用中具有一定指导意义。

参考文献

- [1] 黄宗君. 基于最小生成树理论的配电网故障恢复算法[J]. 继电器, 2003, 31(12): 9-12.
- [2] 庞清乐, 高厚磊, 李天友. 基于负荷均衡的智能配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 342-348.
- [3] 李樊, 刘天琪, 江东林. 采用改进免疫算法的多目标配电网重构[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 134-138.
- [4] Pagani G A, Aiello M. Towards decentralization topological investigation of the medium and low voltage grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 1538-1547.
- [5] 卢志刚, 董玉香. 含分布式电源的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 89-92.
- [6] H Manjari Dola, Badrul H Chowdhury. Intentional islanding and adaptive load shedding to avoid cascading outages[C]. Power Engineering Society General Meeting, 2006: 132-138.
- [7] 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.
- [8] Mao Y, Miu K N. Switch placement to improve system reliability for radial distribution system with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1346-1352.
- [9] 邹必昌. 含分布式发电的配电网重构及故障恢复算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [10] 胡运权. 运筹学基础及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 97-98.
- [11] 徐延炜. 基于人工免疫思想的蚁群算法(AIACS)在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 89-93.
- [12] 李德华, 王韶, 刘洋, 等. 模糊遗传算法和蚁群算法相结合的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 26-31.
- [13] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.
- [14] 刘栋, 陈允平, 沈广, 等. 基于CSP的配电网大面积断电供电恢复模型和算法[J]. 电力系统自动化, 2006(10): 28-32.
- [15] Sun K, Zheng D Z, Lu Q. Strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 912-922.
- [16] Jorge M B, Héctor V O, Miguel L G, et al. Multi-fault service restoration in distribution networks considering the operating mode of distributed generation[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116(11): 67-76.
- [17] 张旭, 程雪婷, 赵冬梅, 等. 电网故障恢复的发展、现状及展望[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 13-19.
- [18] 黄弦超. 含分布式电源的配电网故障恢复模型[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 52-57.

(收稿日期: 2015-05-20) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告