

含分布式电源的配电网恢复供电算法研究

故障后,含有分布式电源的区域形成孤岛,保证重要负荷的供电需求。在形成孤岛时采用广度优先搜索方法计及负荷的重要等级,优先保证重要负荷供电,若电源还有剩余功率可提供,再考虑给下一级负荷恢复供电,当负荷等级相同时应优先给离电源较近的负荷供电。给出恢复供电(以下简称“复电”)算法具体流程,说明各环节的实现过程,最后用算例验证复电算法的有效性和可行性,能够提高系统的供电可靠性。

吴华兵 李红伟 张安安 杜沛阳/西南石油大学电气信息学院
张 欢/中国航油集团贵州石油有限公司



吴华兵/硕士研究生

现代电力系统日趋大型化和复杂化,客观上导致系统故障无法完全避免,如何在故障后快速恢复供电是当前研究的热点^[1-2]。不含分布式电源的配电网一般运用智能或启发式算法实现网络重构^[3-4],保证尽可能多的负荷恢复供电。但当网络节点数量较多且重要负荷供电连续性要求很高,而网络结构复杂时,重构方案的制定往往较为复杂,耗时稍长。分布式电源在故障后可形成孤岛,从而保证重要负荷的供电,这在一定程度上弥补了传统复电方法的缺陷。

近年来,研究含分布式电源的配电网的故障恢复取得了很多成果。文献[5-6]按负荷等级确定了孤岛的形成方案,然后对岛外网络进行重构,其故障恢复策略可以保证较高的供电可靠性,但未讨论故障发生在孤岛内而导致原先计划孤岛不能形成时的情况;文献[7]提出的故障恢复方案在形成孤岛时优先

对本地负荷供电,未计及负荷的重要等级;文献[8-10]基于多代理技术设计了含分布式电源的配电网多代理自恢复系统,该系统能够在一定程度上提高供电可靠性,但系统对各代理之间通信和决策的实时性要求很高。

本文假定待恢复供电区域没有联络线与主网连接,而只能形成孤岛恢复供电。采用一种运用广度优先搜索并考虑负荷重要等级的复电算法,以优先级由高到低的顺序依次恢复供电,保证优先级高的负荷优先恢复供电,同级负荷优先给离电源较近的负荷供电,实现孤岛结构最优。而当失电区域内有多个分布式电源时,可形成组合孤岛,保证开关的操作次数最少。

复电原则和约束条件

1. 复电原则

负荷按对供电可靠性的要求分为一级、二级和三级负荷,由于对一级负荷中断供电可能导致人身事故、设备损坏等严重后果^[11],故复电原则一:优先保证一级负荷的供电,其次是二级负荷,再次是三级负荷。

当负荷的重要等级相同时,为了减少远距离输电带来的诸如线路损耗和线路建设成本增加等不利影响,应对电源就近(以到电源的路径中包含的节点数来判断与电源的距离,节点越多,距离越远)的负荷优先供电。因此,复电原则二:负荷等级和量值相同时,离电源较近的负荷优先供电。

为了充分利用分布式能源,最大限

关键词/Keywords

配电网·
负荷恢复供电·
分布式电源·
孤岛划分·

国家重点基础研究发展计划(2013C 13228203),
四川省教育厅资助科研项目(562335)。

度地保证对负荷供电,因此,复电原则三:孤岛应尽可能多地包含失电负荷。

2. 约束条件

(1) 容量约束

最终形成的孤岛必须满足岛内所有有功负荷总量小于或等于电源的额定容量,若超过,则孤岛无法形成。由于无功可以就地平衡,故本文只考虑有功约束,即

$$\sum_{i=1}^n P_i \leq \sum_{j=1}^m C_j \quad (1)$$

式中, n 为孤岛内包含的有功负荷数; P_i 为第*i*个有功负荷值; m 为失电区内的DG数量; C_j 为第*m*个DG的有功出力。

(2) 功率平衡约束^[12]

$$\sum_{k \in T_i} P_k = \sum_{k \in F_i} P_k + L_i y_i \quad \text{其中 } i \in N \quad (2)$$

式中, T_i 为向母线*i*供电的支路数; F_i 为从母线*i*取用电的支路数; L_i 为母线*i*所带的负荷; y_i 为1或0,为负荷的状态系数, y_i 为1表示负荷供电正常; N 为孤岛包含的母线数。

(3) 辐射状供电约束^[13]

$$g_k \in G_R \quad (3)$$

式中, g_k 为已恢复供电的区域; G_R 为保证网络辐射状拓扑结构的集合。由于所研究的配电系统支路容量较大,因此,不予考虑支路容量限制。

算法实现

故障恢复算法是在配电系统故障已经定位和隔离的前提下实现的,复电算法主要包括搜索DG和有功负荷,初步确定孤岛形成方案,修改并最终确定孤岛形成方案。具体流程如图1所示。该复电算

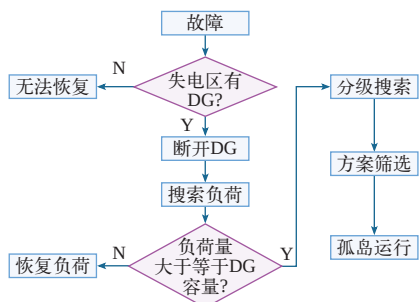


图1 复电算法流程图

法中,无论是对分布式电源还是负荷的搜索均采用广度优先搜索方法,虽然该搜索算法空间复杂度大,且搜索具有一定的盲目性,但在分级搜索负荷时能够很好地满足负荷等级相同时优先恢复较近负荷这一要求。

1. 配电网的树模型

配电网往往采用辐射状的运行方式,因此,若以电源点为根,馈线为枝,则整个配电网可以看成是一棵树,含分布式电源的配电网接入DG并未改变原有的树形结构^[14]。系统发生故障,断开故障支路两侧的开关隔离故障相当于去掉一条支路,去掉一条支路后失电区仍然具有以DG(若含有)或故障点为根的树形结构。图2为某配电网经故障隔离后不与系统侧相连的失电区,其中包含7个母线节点,4台DG,故障支路原先与Bus₁相连,其树形结构如图3所示。

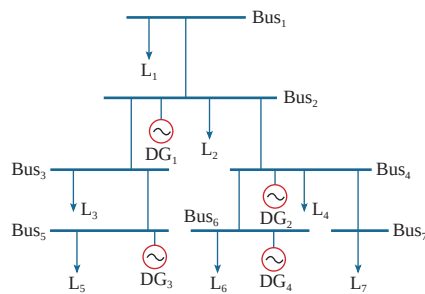


图2 含DG的7节点配电系统

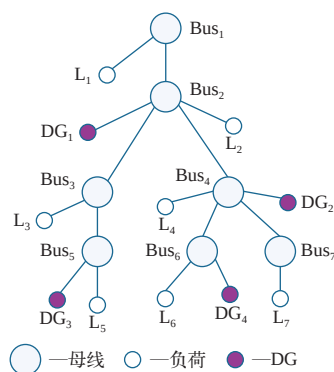


图3 含DG的配电网树形结构

若将Bus₁作为树形结构的第一层,所有与该节点相连的母线节点作为第二层,以此类推,则配电网的树模型就具有了层次结构。而恰好广度优先搜索采取的是按层搜索的原则,以图3为例,首先遍历顶层的节点Bus₁,其次遍历第二层的节

点Bus₂，再次是第三层的节点Bus₃和Bus₄，最后是Bus₅、Bus₆和Bus₇，假设母线上连接的所有DG和负荷信息均可通过访问母线节点而获得，则搜索DG和负荷的过程可转化为遍历配电网树形结构中所有节点的过程。

2. 搜索DG和负荷

系统故障隔离之后，以失电区内故障前与故障馈线连接的母线作为树模型根节点，从该点开始展开搜索。若失电区内未能搜索到DG，则该算法无法对失电负荷恢复供电；若搜索到DG，则返回DG的位置和容量等信息，并且立即断开其出口断路器，之所以要立即断开DG的出口断路器是因为此时还无法确定失电区内所有负荷的大小，若失电区内有功负荷量大于DG的有功出力，则系统频率将会降低，对用电设备带来损害，严重时还可能导致系统崩溃。经验证，从断开DG出口断路器到最终形成孤岛恢复供电的过程持续时间对重要负荷造成的影响可以忽略。

当搜索到失电区内所有DG后，若直接以DG为根节点，开始对负荷进行逐级搜索，确定供电的先后顺序。这可能不是最快的恢复方法，实际配电网还可能存在这样一种情况，即失电负荷较少，DG的容量足以恢复所有的失电负荷，那么，先对负荷逐级搜索就显得多余，为了提高算法的效率，采用先搜索失电区内所有负荷量，再对负荷进行逐级搜索（若有必要）的策略。搜索负荷时以失电区内任一节点开始均可，由于配电网中不存在环形结构，以任意一点作为根节点网络仍具有树形结构，遍历所有母线节点确定有功负荷量后，判断是否满足DG容量约束。若满足，则可以直接合上各DG的出口断路器，所有失电负荷均可恢复供电；若不满足，则开始对负荷进行逐级搜索，以保证重要的负荷优先恢复供电。

3. 初步确定孤岛形成方案

在逐级搜索负荷初步确定孤岛形成方案之前，做出如下3点假设。

- 1) 假设1。各母线上的负荷等级确定，且为一级、二级和三级负荷其中之一。
- 2) 假设2。各母线上的负荷均为不可控负荷^[15]

（不可控负荷：在母线通电的同时得到全部供电恢复，否则完全不能恢复供电）。

3) 假设3。各DG均可作为备用电源，具有一定的调频调压能力，其输出功率可在一定范围内调节。

首先搜索一级负荷，以任意一条接有DG的母线作为根节点开始搜索，每搜索到一个节点则先判断其所接负荷等级是否符合当前搜索等级，若不符合，则继续搜索同层的其他节点；若符合，读取负荷量。紧接着判断加入该负荷后是否超过所有DG提供的总功率（将所有DG的有功出力看成一台DG的有功出力），若没有超过，则继续搜索，一旦超过，则记录当前最后一个搜索到的负荷（为方便下文叙述，不妨称其为负荷L），再继续搜索完余下的全部一级负荷（余下所有负荷构成集合C），此时不必边搜索边比较，找出集合C中所有比L小的负荷构成集合D，依次用D中最大者替换L，并检查是否满足DG容量约束，若满足，则替换L并与L之前搜索到的负荷一起构成初步孤岛方案，即此时找到了一种可行的孤岛。当DG恢复了所有一级负荷的供电后其提供的有功功率还有剩余时，按照搜索一级负荷的方式搜索二级负荷，以此类推。此步骤中将所有DG的有功出力看成一台DG的有功功率，实质上是直接形成组合孤岛，之所以选择直接形成孤岛，一方面是可以减少形成独立孤岛而断开各DG之间的连接线路所需要的开关操作，另一方面形成组合孤岛也能够一定程度上提高对岛内负荷供电的稳定性。图4为搜索负荷流程图。

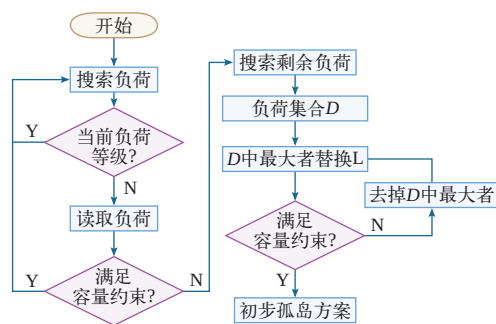


图4 搜索负荷流程图

4. 确定最终孤岛形成方案

当失电区内不止一台DG时，分别从每台DG出

发搜索形成的孤岛可能不尽相同。这与搜索方式和负荷位置有关。以图3所示的系统为例说明，图3中各DG的有功容量和负荷量如下表所示，假设所有负荷的重要等级相同。若从与DG₃相连的Bus₅节点开始广度优先方式搜索，则搜索结果为包含Bus₁、Bus₁、Bus₃、Bus₅以及包含4台DG的孤岛，其恢复负荷总量为150 kW；若从Bus₆开始搜索，则形成只包含Bus₄、Bus₆和所有DG的孤岛，恢复负荷总量为180 kW。由此可以看出，从不同DG出发搜索出的孤岛存在差异，应从中选择最优的一种或几种方案作为最终的孤岛形成方案，选取恢复负荷量最多的孤岛作为最终的方案。确定孤岛后，闭合各DG的出口断路器和相应的负荷开关，切除部分负荷（等效于接入相应负荷），进入孤岛运行。

表 各DG的有功容量和负荷量

DG或负荷	有功功率/kW	负荷	有功功率/kW
DG ₁	30	L ₃	30
DG ₂	50	L ₄	100
DG ₃	70	L ₅	60
DG ₄	40	L ₆	80
L ₁	50	L ₇	90
L ₂	60		

算例分析

算例1。图5为IEEE 33节点母线测试系统，各母线上的有功负荷和负荷等级（I，II，III）已在图中标示出来，该系统接入4台DG，各DG的有功出力 and 接入位置已在图5中标示出。

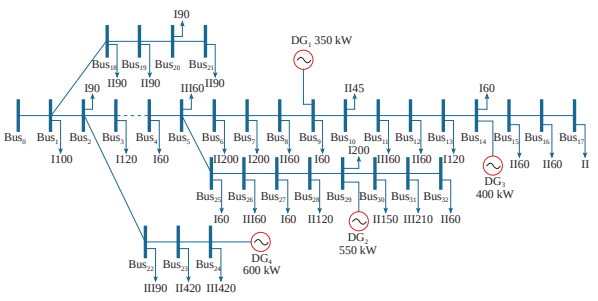


图5 IEEE 33节点测试系统

现假设在母线3和母线4之间发生了永久性故障，母线3、母线4之间的馈线支路断开，运用所提复电算法所得结果形成的孤岛如图6所示（没有画出负荷的母线表示该母线上的负荷被切掉）。图6为以Bus₁₄为根节点搜索形成的孤岛，该孤岛方案恢复了失电区内所有一级负荷及部分二级负荷，恢复的总负荷量为1 255 kW，比以其他DG所连母线为根节点搜索恢复的负荷总量多，为最优方案。

算例2。图7为IEEE 69节点配电网系统。图

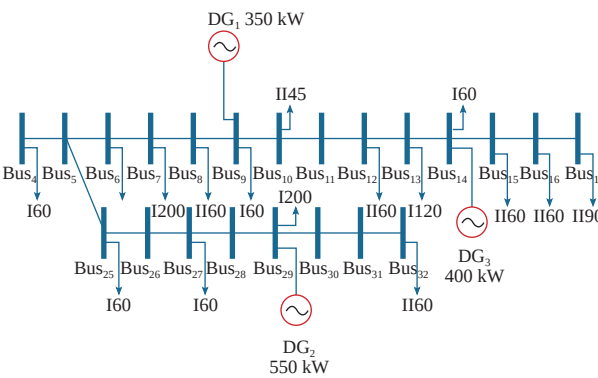


图6 最优孤岛形成方案

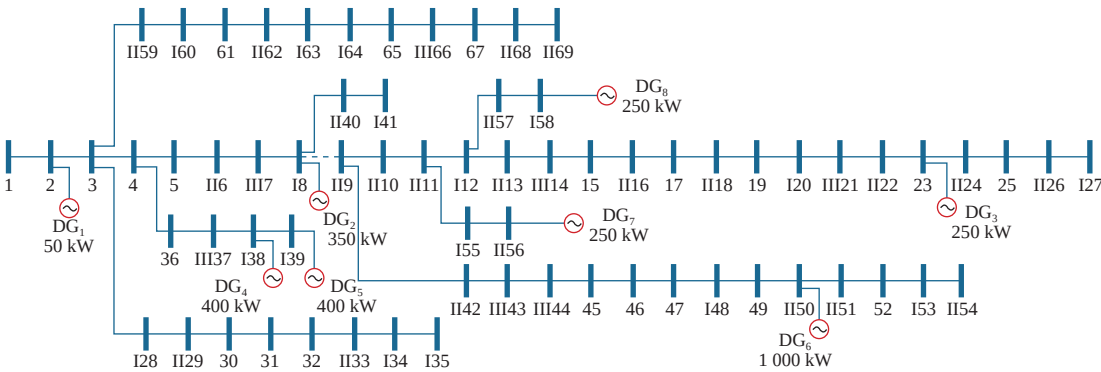


图7 含分布式电源的69节点配电网系统

7中, 母线下方的数字为母线编号, I、II和III分别表示母线上所接负荷等级为一级、二级和三级。母线编号前不含I、II和III表示该母线上负荷为零; 其中分布式电源的数量、容量以及接入位置采用文献[14]所提供的数据, 各DG的有功出力 and 接入位置已在图7中标示出。

假设连接Bus₈和Bus₉的馈线发生故障, 失电区内的DG总功率为2 250 kW, 失电负荷总功率为2 514.55 kW, 应用所提复电算法得到的最优孤岛如图8所示, 恢复负荷高达2 248.85 kW。图8中, 用细线绘制的母线表示其上负荷被切除。

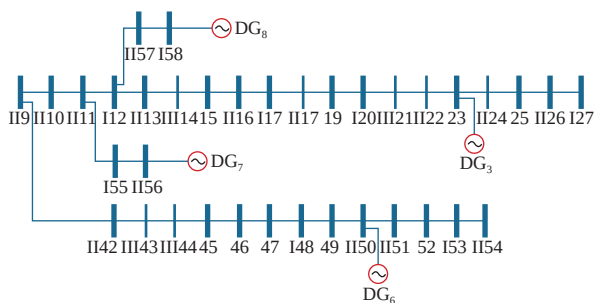


图8 最优孤岛方案

结束语

该复电算法在系统故障后能够在含有DG的失电区内快速形成孤岛, 在形成孤岛时采用了广度优先搜索同时考虑了负荷的重要等级, 保证了重要负荷的优先供电, 算例证明了该复电算法的有效性和可行性, 能够提高系统的供电可靠性。

参考文献

- [1] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [2] 李红伟, 孔冰, 李超. 基于网损最小的配电网多代理复电系统设计 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34 (4): 162-168, 174.
- [3] 王林川, 梁栋, 于冬皓, 等. 基于遗传和禁忌搜索混合算法的配电网重构 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (6): 27-30.
- [4] 董家读, 黄彦全, 郭益辉. 辐射型配电网重构的启发式算法 [J]. 陕西电力, 2012 (1): 8-11.
- [5] 唐鸿奎, 李青, 唐艳. 含分布式电源的配电网故障恢复策略 [J]. 电气制造, 2014 (6): 29-31.
- [6] 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.
- [7] 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, 2001, 31 (1): 89-92.
- [8] 黎恒烜, 孙海顺, 文劲宇. 含分布式电源的配电网多代理故障自恢复系统 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (4): 49-56, 19.
- [9] Sharma A, Arokiasami W A, Srinivasan D. A multi-agent approach for service restoration with distributed generation [C]. Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2013: 1-6.
- [10] Solanki J M, Khushalani S, Schulz N N. A multi-agent solution to distribution systems restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (3): 1026-1034.
- [11] 于永源, 杨绮雯. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [12] Nagata T, Sasaki H. A multi-agent approach to power system restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (2): 457-462.
- [13] 王守相, 李晓静, 肖朝霞, 等. 含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 10 (31): 61-65, 81.
- [14] 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.
- [15] Yiming Mao, Miu K. Switch placement to improve system reliability for radial distribution system with distributed generation [C]. Power Engineering Society General Meeting, 2004: 6-10.

(收稿日期: 2015-01-19) EA