

基于路径描述的馈线分区 $N-1$ 可装容量计算方法

孙明¹, 董树锋¹, 夏圣峰², 吴浩¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网福建省电力有限公司福州供电公司, 福建省福州市 350009)

摘要: 评估馈线供电能力是保障馈线可靠运行的重要手段。文中提出了一种基于路径描述的馈线分区 $N-1$ 可装容量计算方法。首先, 将同一电压等级配电网以自动/手动开关装置为边界划分馈线分区, 视为负荷节点; 采用所有负荷节点及其所有可能供电路径的集合描述配电网拓扑结构。随后, 以路径状态为变量, 建立了馈线 $N-1$ 安全校验的 0-1 线性规划模型。针对电网营销部门的实际数据需求, 以路径状态和馈线分区可装容量为变量, 进一步建立了用于馈线分区 $N-1$ 可装容量计算的混合整数线性规划模型。最后, 以某省会城市实际运行的某一 10 kV 馈线组为例, 验证了所提算法的实用性和有效性。

关键词: 供电路径; $N-1$ 安全校验; 线性规划; 可装容量

0 引言

随着经济的飞速发展, 建设用地紧张, 获取新馈线的地下通道较为困难, 现有配电网馈线的供电能力评估受到了广泛关注^[1-5]。在实际情况中, 用户申报容量接入需参考电网营销部门公布的馈线可装容量数据, 但是该数据获取仍处于人工分析阶段, 准确性和效率较低。考虑配电网运行可靠性, 有必要得到科学合理的方案用于计算满足 $N-1$ 安全校验的馈线可装容量。

经相关文献调研, 目前该方面的研究较少。文献[1]提出了负荷能力法计算配电网满足辐射状正常运行时的最大供电能力, 没有考虑 $N-1$ 故障时负荷的转供情况。文献[2]计及馈线 $N-1$ 情况, 提出了基于馈线互联关系的配电网最大供电能力模型。但该模型负荷转供策略单一, 未计及动作开关状态变化的多样性, 也未考虑在现有网络和负荷布局不变时计算馈线的最大可装容量。在计算满足 $N-1$ 安全准则^[6-8]的馈线可装容量时, 很关键的一环是判断是否可以通过有效联络转供负荷实现供电恢复, 因配电网规模庞大, 动作开关装置众多, 联络方式复杂多变, 负荷转供分析较为困难, 有很多学者对此问题开展了研究。

目前, 负荷转供算法大致有启发式搜索算法、随

机优化算法、专家系统法、混合算法等四类。启发式搜索算法^[9]根据失电区拓扑、转移容量和电气联络等信息搜索可用的联络/分段开关, 设计启发式规则确定最优搜索方向, 得到负荷转供方案。该算法可有效缩小解空间, 适应各种结构不同的网络, 但解的质量依赖于网络初始状态, 随着配电网联络复杂度的提高, 设计合理的启发式规则较为困难。随机优化算法^[10-12]采用较完善的配电网供电恢复模型, 利用遗传算法和粒子群算法等寻优算法获得最优或次优解, 但计算时间较长, 实时性差。专家系统法^[13-14]模拟人类专家的决策过程, 能够自动生成故障后负荷转供方案, 实时性好, 适用性广, 但知识库的建立和集成耗时较长, 且难以涵盖所有故障情况。结合以上算法的优缺点和适用范围, 一些学者提出了混合算法^[15-18], 例如: 文献[15]通过专家系统得到某些开关操作方案, 减少甩负荷量, 采用遗传算法分割失电区, 寻找供电方案; 文献[16]将二进制粒子群算法和差分进化算法相结合, 提出了一种能够合理配合配电网重构和孤岛划分的负荷转供策略。

针对上述情况, 在配电网规划阶段, 本文提出了一种基于路径描述的馈线 $N-1$ 安全校验和可装容量计算方法。该方法采用负荷节点及其供电路径描述配电网拓扑结构; 以负荷转供后配电网正常运行为约束条件, 以动作开关数最少为目标函数建立配电网 $N-1$ 安全校验模型, 通过 0-1 线性规划求解路径状态, 确定负荷转供方案; 同时, 计算馈线分区 $N-1$ 可装容量, 为电网营销业扩报装提供数据支撑。

收稿日期: 2016-11-01; 修回日期: 2017-02-19。

上网日期: 2017-06-06。

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2014AA051901)。

1 基于路径的配电网拓扑描述

基于图的算法被广泛应用于电力网络的拓扑分析中,关联矩阵是表示电网节点和支路关系的最简单的方法。然而,为保证关联矩阵中各行相互独立,一些支路的实际连接关系被省略。同时,在配电网 $N-1$ 校验时,为分析负荷转带方案,不仅需要相邻节点间的连接关系,也需要获得节点与非相邻节点的径向连接信息,但基于图的算法难以获得上述信息^[19]。针对此情况,本文拟采用基于路径描述的算法进行分析研究。

接入馈线的用电负荷众多,为简化计算,根据馈线故障时故障扩散范围与恢复供电范围的特点,可将馈线组以自动隔离装置和联络开关等开关装置为边界划分为多个馈线分区^[20]。合并分区内所有负荷,简化馈线分区为负荷节点后,再进行负荷转供分析。显然,简化后馈线组网络中的支路可以与开关装置一一对应。

将配电网中的各节点分为负荷节点和电源节点,其中电源节点指给配电网负荷供电的变电站节点。对于配电网中的任意一个负荷节点,一般有多条可供选择的供电路径。配电网通常是闭环设计、开环运行的,在实际运行时,每一个负荷节点有且仅有一条供电路径。由此可见,配电网拓扑可以用该网络中所有负荷节点及其所有可能供电路径的集合加以描述。

定义 π_k^i 为负荷节点 i 的第 k 条可能供电路径,该路径为连接负荷节点 i 与某一电源节点的所有支路的集合。设负荷节点 i 共有 p 条可能的供电路径,若用集合 Π_N^i 表示上述所有供电路径,则

$$\Pi_N^i = \{ \pi_1^i, \pi_2^i, \dots, \pi_k^i, \dots, \pi_p^i \} \quad (1)$$

根据配电网辐射状运行的特点,集合 Π_N^i 中的路径至多有一条是通路,故有必要对路径的连通与否进行描述,定义二进制变量 W_k^i 描述路径 π_k^i 的状态:

$$W_k^i = \begin{cases} 1 & \text{路径 } \pi_k^i \text{ 连通} \\ 0 & \text{路径 } \pi_k^i \text{ 不连通} \end{cases} \quad (2)$$

文献[19]证明了若以下两个约束条件成立,则网络连通且是辐射状的。

1) 对于任意一个负荷节点 i 对应的路径集合,有且仅有一条是连通的,即

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_N^i} W_k^i = 1 \quad \forall i \quad (3)$$

2) 若路径 π_k^i 为通路,那么包括在路径 π_k^i 内的任意路径 π_m^l 也是通路,即

$$W_k^i \leq W_m^l \quad \forall \pi_m^l \subset \pi_k^i \quad (4)$$

为便于理解,下面以图1所示的简单网络为例阐述以上定义。

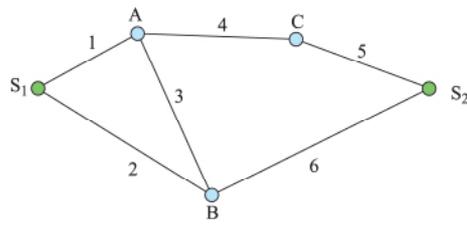


图1 简单配电网拓扑图
Fig.1 Simple distribution network topology

图1中 S_1 和 S_2 为电源节点, A, B, C 为负荷节点, 1 至 6 为支路。该网络的所有可能路径如附录 A 表 A1 所示。

若图1中的网络连通且为辐射状的,则式(3)和式(4)同时成立,即

$$\begin{cases} \sum_{\pi_k^A \in \Pi_N^A} W_k^A = 1 \\ \sum_{\pi_k^B \in \Pi_N^B} W_k^B = 1 \\ \sum_{\pi_k^C \in \Pi_N^C} W_k^C = 1 \\ W_2^B \leq W_1^A \\ W_1^C \leq W_1^A \\ W_2^A \leq W_1^B \\ W_4^B \leq W_3^A \leq W_2^C \\ W_3^C \leq W_4^A \leq W_3^B \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} W_2^B \leq W_1^A \\ W_1^C \leq W_1^A \\ W_2^A \leq W_1^B \\ W_4^B \leq W_3^A \leq W_2^C \\ W_3^C \leq W_4^A \leq W_3^B \end{cases} \quad (6)$$

负荷节点供电路径搜索方法详见文献[19],在此不再赘述。为便于描述配电网运行时其他约束条件和支路的通断状态,定义如下集合。

1) $\Pi_S^i = \{ \text{由电源 } i \text{ 供电的所有路径} \}$ 。

2) $\Pi_B^i = \{ \text{经过支路 } i \text{ 的所有路径} \}$ 。

3) 若支路 l 所连接的节点分别为 i 和 j , 则 $\Pi_P^i = \{ \text{以 } i \text{ 为终点经过支路 } l \text{ 的所有路径} \}$, $\Pi_P^j = \{ \text{以 } j \text{ 为终点经过支路 } l \text{ 的所有路径} \}$ 。

2 馈线 $N-1$ 安全校验

配电网馈线 $N-1$ 准则要求馈线任意位置发生故障时,可以实现故障隔离,并结合馈线联络方式通过改变动作开关运行状态转供负荷至其他馈线,满足其用电需求。在配电网规划中,一般以全年最大负荷作为校验条件^[9]。配电网规模庞大,每个供电分区的供电范围通常较为明确,正常运行时一般不交叉、不重叠^[20]。因此,本文以馈线组为单位,针对馈线故障中最严重的情况——馈线出口故障,建立

0-1 线性规划模型进行馈线 N-1 安全校验。

2.1 约束条件

设某一馈线组网络中包含 n 个负荷节点, s 个电源节点, b 条支路, 第 i 个负荷节点的负载量为 L_i , 第 j 个电源节点的容量为 S_j , 第 m 条支路的最大载流量为 B_m 。对任一条待 N-1 安全校验的馈线, 经负荷转供后, 重构网络需满足式 (3) 和式 (4), 即网络连通且为辐射状, 同时应满足以下约束条件:

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_S^i} W_k^i L_i \leq S_j \quad (7)$$

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_B^m} W_k^i L_i \leq B_m \quad (8)$$

式中: $\pi_k^i \in \Pi_N^i; i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, s; m=1, 2, \dots, b$ 。

式 (7) 为电源容量约束, 表示由第 j 个电源供电的所有负荷的负载量之和不超过该电源容量。式 (8) 为馈线载流量约束, 表示第 m 条支路的实际载流量不超过其最大值。

2.2 优化目标

满足馈线 N-1 准则的负荷转供方案可能不止一个, 在配电网实际运行中, 开关装置动作需要一定的时间, 为尽快恢复供电, 本文采用基于动作开关数最优的原则确定负荷转供方案。同时, 开关装置动作数越少, 网络结构改变越小, 越容易在故障修复后恢复到原运行状态。另外, 减少开关次数亦可降低开关操作费用, 相对延长开关的使用寿命。

由 2.1 节可知, 开关装置的动作与否可以用其所在支路的通断状态描述。为得到用路径状态表示支路通断状态的表达式, 首先证明下述命题成立。

命题: 在经 2.1 节简化后的馈线组网络中, 连接负荷节点 i 和 j 的支路 l 为通路的充要条件为经过支路 l 给负荷节点 i 和 j 供电的所有路径状态和为 1, 即

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_P^i} W_k^i + \sum_{\pi_k^j \in \Pi_P^j} W_k^j = 1 \quad (9)$$

上述命题证明如下。

充分性: 因为 $\Pi_P^i \subset \Pi_N^i$ 且 $\Pi_P^j \subset \Pi_N^j$, 结合式 (3) 和式 (9) 可知有式 (10) 或式 (11) 成立。

$$\begin{cases} \sum_{\pi_k^i \in \Pi_P^i} W_k^i = 0 \\ \sum_{\pi_k^j \in \Pi_P^j} W_k^j = 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sum_{\pi_k^i \in \Pi_P^i} W_k^i = 1 \\ \sum_{\pi_k^j \in \Pi_P^j} W_k^j = 0 \end{cases} \quad (11)$$

若式 (10) 成立, 则说明负荷节点 j 的供电路径经过支路 l , 故支路 l 为通路。同理可证, 若式 (11) 成立, 支路 l 为通路。因此, 命题充分性得证。

必要性: 若支路 l 为通路, 由配电网辐射状运行可知, 支路 l 中有电流且方向唯一。若电流从节点 i 流向节点 j , 则式 (10) 成立; 反之, 式 (11) 成立。故式 (9) 成立, 必要性得证。

设集合 I_s 表示原运行方式下联络开关所在支路的集合, 集合 D_s 表示分段开关所在支路的集合。若动作开关所在支路 l 所连接的节点分别为电源节点和负荷节点, 则需在电源节点和动作开关之间构造一个负载量为 0 的负荷节点。结合式 (9), 得到基于开关数最优的目标函数如下:

$$\min \left\{ \sum_{l \in I_s} \left(\sum_{\pi_k^i \in \Pi_P^i} W_k^i + \sum_{\pi_k^j \in \Pi_P^j} W_k^j \right) + \sum_{l \in D_s} \left(1 - \sum_{\pi_k^i \in \Pi_P^i} W_k^i - \sum_{\pi_k^j \in \Pi_P^j} W_k^j \right) \right\} \quad (12)$$

式中: 前一个求和式表示联络开关动作数, 后一个求和式表示分段开关动作数。

综上所述, 以重构后配电网正常运行, 即式 (3)、式 (4)、式 (7) 和式 (8) 为约束条件; 将实现负荷转供需操作的动作开关数最少化, 即式 (12) 作为目标函数, 可得到馈线 N-1 安全校验模型。该模型中, 未知量为各路径状态, 可通过 0-1 线性规划计算求解。若上述模型无解, 则待校验馈线不满足 N-1 安全准则。若有解, 则该馈线可通过 N-1 安全校验, 可根据解得的路径状态确定各动作开关所在支路的通断状态, 得到负荷转供方案。经模型求解, 若馈线组中所有馈线均满足 N-1 安全准则, 则说明该馈线组可通过 N-1 安全校验。

需要指出的是, 与现有在规划阶段计算配电网供电能力文献的处理方法一样, 本文在 N-1 校验时重点考虑元件的过载, 将无功功率、电压和网损等因素做了简化处理。为满足供电末端电压质量要求, 本文在第 1 节路径搜索时, 根据文献 [21] 配电网规划设计技术导则并结合现场运行经验, 通过设定供电路径长度阈值, 建立供电路径长度约束条件, 自动剔除较长路径, 从而近似考虑了电压约束条件。例如: 对于 10 kV 中压配电网, 针对 A+, A, B 类供

电区域,不考虑供电长度超过 3 km 的供电路径等。同时,网损已近似包含在负荷节点负载量中。

3 馈线分区 N-1 可装容量计算

3.1 馈线分区 N-1 可装容量模型

对馈线组进行 N-1 安全校验后,若不满足 N-1 准则,则需采取相关措施,进行配电网网架改造调整,提高供电可靠性;若待分析馈线组可通过 N-1 安全校验,进而可计算满足 N-1 准则的馈线分区可装容量,为业扩接入方案提供数据支撑。

在计算馈线分区 N-1 可装容量时,需满足至少存在一种运行方式使配电网呈辐射状正常运行,同时该馈线组可通过 N-1 安全校验。设负荷节点 l 可接入容量为 C_l,将 C_l 最大作为目标函数,以满足馈线故障前后配电网均能长时间正常运行为约束条件,分别建立可装容量模型。

本节中,各种情况下负荷节点可装容量模型中的约束条件与 2.1 节类似,包括式(3)和式(4)所示配电网辐射状运行约束、式(13)所示电源容量约束和式(14)所示馈线载流量约束。

$$\sum_{\pi_k^i \in II_S^i} W_k^i L_i + \sum_{\pi_k^l \in II_S^l} W_k^l C_l \leq S_j \quad (13)$$

$$\sum_{\pi_k^i \in II_B^m} W_k^i L_i + \sum_{\pi_k^l \in II_B^m} W_k^l C_l \leq B_m \quad (14)$$

与式(7)和式(8)所示约束条件相比,式(13)和式(14)中出现了路径状态变量 W_k^l 和负荷节点可接入容量 C_l 相乘的求和式,求解较困难。为便于求解,引入变量 Z_k^l:

$$Z_k^l = W_k^l C_l \quad (15)$$

可以证明,式(16)和式(17)与式(15)等价。

$$|Z_k^l| \leq M W_k^l \quad (16)$$

$$|Z_k^l - C_l| \leq M(1 - W_k^l) \quad (17)$$

式中: M 为一个足够大的常数。

证明过程如下:

因 W_k^l = 0 或 W_k^l = 1,代入式(16)和式(17)得:

$$\begin{cases} W_k^l = 0 \\ Z_k^l = 0 \\ |C_l| \leq M \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} W_k^l = 1 \\ Z_k^l \leq M \\ Z_k^l = C_l \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可得 Z_k^l = W_k^l C_l,故上述命题成立。

于是,可得到各种情况下负荷节点 l 可装容量的混合整数线性规划模型为:

$$\begin{cases} \max C_l \\ \text{s. t.} & \text{式(3)和式(4)} \\ & \sum_{\pi_k^i \in II_S^i} W_k^i L_i + \sum_{\pi_k^l \in II_S^l} Z_k^l \leq S_j \\ & \sum_{\pi_k^i \in II_B^m} W_k^i L_i + \sum_{\pi_k^l \in II_B^m} Z_k^l \leq B_m \\ & \text{式(16)和式(17)} \end{cases} \quad (19)$$

通过求解上述模型,可得到负荷节点 l 在馈线无故障和任一条馈线出口故障时可通过 N-1 安全校验的可接入最大容量 C_l。任一馈线出口故障时,通过上述模型分析得到的容量 C_l 为所有 N-1 转供方案中可接入的最大容量;若负荷节点 l 接入容量大于该值,则必然不满足 N-1 安全准则。

显然,负荷节点 l 所在馈线分区的 N-1 可装容量为上述各种情况下求解得到的 C_l 最小值。

3.2 馈线 N-1 可装容量计算流程

对于一个有 α 条出线的待计算馈线组,馈线分区 l 的 N-1 可装容量计算流程如图 2 所示。

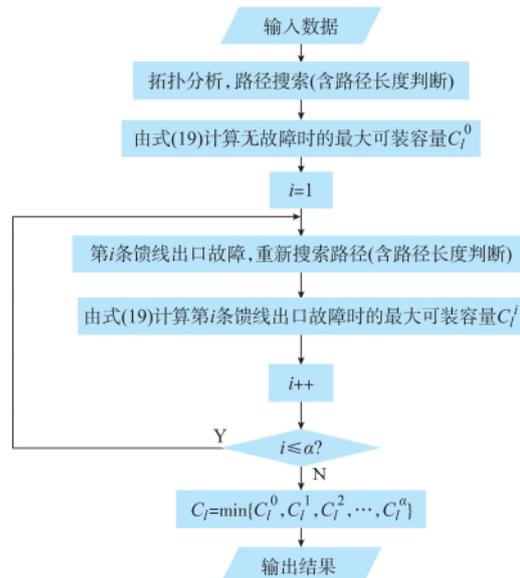


图 2 馈线分区 N-1 可装容量计算流程图
Fig. 2 Calculation flow chart for available capacity of feeder partition satisfied with N-1 security criterion

4 算例分析

4.1 算例概况

所提算法利用 Java 语言实现,算例选用某省会城市实际运行的某一 10 kV 馈线组网络。根据 2.1 节简化方法,将实际网络以动作开关装置为边界划分馈线分区并进行负荷合并,得到待分析网络接线图如图 3 所示。

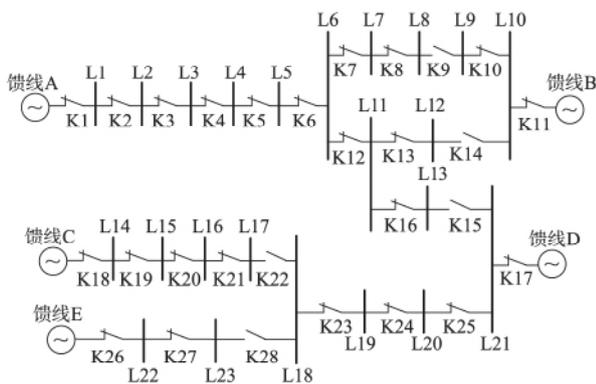


图3 算例网络
Fig.3 Example network

图3中有5条馈线,23个馈线分区,28个动作开关装置,其中包括5个联络开关,23个分段开关。馈线分区装见容量是指馈线分区内所有负荷的实际接入容量,一般为用户的报装容量之和^[22]。附录B表B1给出了算例网络中各馈线分区的装见容量。

4.2 $N-1$ 安全校验结果

在算例分析时,首先根据第1节的方法用路径描述图3所示的网络拓扑,在路径搜索时,根据馈线分区的供电区域类型自动剔除较长的供电路径,得到每个馈线分区的可能供电路径、由每个电源供电的所有可能路径和经过每条支路的所有可能路径等集合,同时识别联络开关和分段开关,为 $N-1$ 安全校验和馈线分区 $N-1$ 可装容量计算奠定基础。

依次假设馈线A至E出口故障,根据式(3)、式(4)、式(7)、式(8)及式(12)建立馈线 $N-1$ 安全校验模型,0-1线性规划求解路径状态。根据模型解是否存在来判断待校验馈线是否满足 $N-1$ 准则;采用2.2节方法获得负荷转供方案。所提算法的馈线 $N-1$ 安全校验结果和基于Java语言编写的程序运行时间见表1。

表1 $N-1$ 安全校验结果
Table 1 Results of $N-1$ security verification

故障馈线	是否通过 $N-1$ 校验	目标函数值	转供馈线	开关操作	程序运行时间/ms
A	是	3	B, D	断开 K7; 闭合 K9 和 K15	81
B	是	3	D	断开 K12; 闭合 K15 和 K14	76
C	是	1	D	闭合 K22	27
D	是	1	C	闭合 K22	36
E	是	1	D	闭合 K28	26

因将负荷转供方案分析转化为0-1线性规划模型的求解,程序运行时间较短,计算速度较快。校验结果显示,算例馈线组所有馈线均能通过 $N-1$ 安全校验。当馈线A故障时,待恢复供电区负载量较大,通过断开分段开关K7,可将失电区分割为两部

分,分别通过馈线B和馈线D恢复供电。当馈线B故障时,考虑到重构后的配电网仍需辐射状运行,首先通过断开分段开关K12、闭合联络开关K15将馈线分区L11和L12的负荷由馈线A转移至馈线D供电,再通过闭合联络开关K14实现失电区负荷供电恢复。当馈线C、D、E故障时,结合图3和表1可知,有多种方案可实现负荷转供,基于动作开关数最少的原则,本文算法求解得到的方案仅需一个开关装置动作,操作方案较简单,大大缩短了运行人员执行操作票耗时同时减小了误操作的可能性。

综合以上分析可知,本文所提算法有以下优势:

- ①所提算法全面考虑了馈线分段和各馈线间的联络,所得 $N-1$ 校验结果更为准确;
- ②通过采用Java实现的“分支定界法”求解0-1线性规划模型进行负荷转供分析,计算速度较快;
- ③采用基于拓扑的分析方式,与专家系统法针对故障建立知识库相比,所得方案的覆盖范围更广。

4.3 馈线 $N-1$ 可装容量计算结果

由式(19)根据3.2节馈线分区 $N-1$ 可装容量计算流程,求得各馈线分区 $N-1$ 可装容量计算结果如表2所示。

表2 馈线分区 $N-1$ 可装容量
Table 2 Available capacity of feeder partition satisfied with $N-1$ security criterion

馈线分区	$N-1$ 可装容量/MVA	馈线分区	$N-1$ 可装容量/MVA
L1	5.529	L13	5.529
L2	5.529	L14	10.169
L3	5.529	L15	10.169
L4	5.529	L16	10.169
L5	5.529	L17	10.169
L6	5.529	L18	0.759
L7	8.444	L19	0.759
L8	8.654	L20	0.759
L9	11.174	L21	0.759
L10	11.174	L22	0.759
L11	5.529	L23	0.759
L12	11.174		

结合图3、附录B表B1和表2可知,馈线分区及与之相邻分区的装见容量和馈线联络情况均会影响 $N-1$ 可装容量计算结果。例如:馈线分区L22的装见容量较大,为13.47MVA,若其所在馈线E发生故障,则需转供的负荷量较大,考虑馈线联络和各馈线的已有负荷情况,失电区负荷仅能通过馈线D转供,故可接入馈线D和E的 $N-1$ 可装容量较小,即馈线分区L18至L23的 $N-1$ 可装容量较小,仅为0.759MVA。对于馈线分区L9、L10、L12,因其已有负载较轻,在馈线故障时,直接联络馈线较多且

这些馈线的负载不重,故而 $N-1$ 可装容量较大,为 11.174 MVA。

目前,电力局一般采用人工依据经验评估配电网馈线的可装容量。对于 10 kV 馈线组网络,记馈线限流值为 I_{per} ,馈线实际运行的最大电流值为 I_{max} ,则该馈线可装容量 C 的计算公式为:

$$C = 10 \times \sqrt{3} (KI_{per} - I_{max}) \quad (20)$$

式中: K 为经验系数,一般取 0.7。

按照当前运行方式划分馈线供电的馈线分区范围,采用式(20),可计算得到图3算例网络中各馈线的可装容量经验分析结果,例如馈线 A 和 D 的可装容量分别为 4.100 MVA 和 6.405 MVA。对于馈线 A 上的各馈线分区,本文算法得到的 $N-1$ 可装容量大于人工经验分析结果,馈线 D 的可装容量却较小。经分析,导致该现象的原因主要是人工经验分析未充分考虑馈线联络和馈线 $N-1$ 安全准则,灵活性较差。对于馈线 A,可通过馈线有效联络和分段改变该馈线组的运行方式,增大无故障时馈线 A 的可装容量;当馈线 $N-1$ 故障时,亦可通过馈线联络与分段划分失电区负荷,恢复供电。故而,人工经验分析得到的馈线 A 可装容量偏小。对于馈线 D,因馈线分区 L22 的负载较重,若馈线 E 出口故障时,考虑馈线联络,失电区负荷只能转供至馈线 D,故本文算法得到的馈线 D 中各馈线分区可装容量较小,仅为 0.759 MVA;人工经验分析方法仅通过系数 K 粗略考虑馈线 $N-1$ 情况,不能广泛适用于各种负荷布局和馈线联络的情况,导致馈线 D 可装容量计算结果过于乐观。另外,人工经验分析方法根据运行方式划分馈线供电范围,未考虑实际运行方式的变化,计算结果较为粗略。因此,本文所提算法以馈线分区为单位计算 $N-1$ 可装容量,较人工经验分析更为准确,计算结果更加可靠。

5 结语

本文采用负荷节点及其供电路径描述配电网拓扑,建立了基于路径的配电网 $N-1$ 安全校验模型,进一步提出了馈线分区 $N-1$ 可装容量计算方法。与现有研究方法相比,所提算法有以下特点:①采用基于配电网拓扑的分析方法,不需针对故障与馈线具体联络方式建立知识库或设计启发式搜索规则,所得 $N-1$ 安全校验结果较为全面,适用范围较广;②负荷转供方案和馈线 $N-1$ 可装容量均可通过求解线性规划模型得出,计算速度较快;③与电力局经验公式分析相比,可较准确地求得馈线分区 $N-1$ 可装容量。

随着配电网的快速发展,用户对于用电质量的

要求不断提高,考虑到电网营销数据发布需求,本文所提算法有较高的实用价值和较好的应用前景。随着配电网量测技术的不断发展,下一步计划较为精确地考虑电压约束条件,完善馈线 $N-1$ 安全校验和馈线分区 $N-1$ 可装容量计算模型。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] MIU K N, CHIANG H D. Electric distribution system load capability: problem formulation, solution algorithm, and numerical results[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 436-442.
- [2] 肖峻,谷文卓,贡晓旭,等.基于馈线互联关系的配电网最大供电能力模型[J].电力系统自动化,2013,37(17):72-77. XIAO Jun, GU Wenzhuo, GONG Xiaoxu, et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 72-77.
- [3] XIAO J, LI F, GU W Z, et al. Total supply capability and its extended indices for distribution systems: definition, model calculation and applications[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(8): 869-876.
- [4] DENG Y, CAI L, NI Y. Algorithm for improving the restorability of power supply in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1497-1502.
- [5] 肖峻,祖国强,贺琪博,等.馈线联络对配电网最大供电能力的作用机理[J].电力系统自动化,2015,39(8):38-44. DOI: 10.7500/AEPS20140722001. XIAO Jun, ZU Guoqiang, HE Qibo, et al. Influence mechanism of feeder links on total supply capability for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 38-44. DOI: 10.7500/AEPS20140722001.
- [6] 国家电网公司.城市电力网规划设计导则[S].北京:中国电力出版社,2006.
- [7] 肖峻,贡晓旭,王成山.配电网最大供电能力与 $N-1$ 安全校验的对比验证[J].电力系统自动化,2012,36(18):86-91. XIAO Jun, GONG Xiaoxu, WANG Chengshan. Comparative research between TSC and $N-1$ security verification for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 86-91.
- [8] 刘佳,程浩忠,肖峻,等.计及 $N-1$ 安全准则的智能配电网多目标重构策略[J].电力系统自动化,2016,40(7):9-15. DOI: 10.7500/AEPS20150527006. LIU Jia, CHENG Haozhong, XIAO Jun, et al. A multi-objective reconfiguration strategy for smart distribution network considering $N-1$ security criterion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 9-15. DOI: 10.7500/AEPS20150527006.
- [9] 潘晶.城市配电网规划自动 $N-1$ 校验研究[D].天津:天津大学,2008.
- [10] FUKUYAMA Y, CHIANG H D, MIU K N. Parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy

- Systems, 1996, 18(2): 111-119.
- [11] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41.
- [12] 黄红程, 顾洁, 方陈. 基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 89-96. DOI: 10.7500/AEPS20140517002.
HUANG Hongcheng, GU Jie, FANG Chen. Application of undirected spanning tree-based parallel genetic algorithm in distributed network reconfiguration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 89-96. DOI: 10.7500/AEPS20140517002.
- [13] LIU C C, LEE S J, VENKATA S S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 619-626.
- [14] CHEN C S, LIN C H, TSAI H Y. A rule-based expert system with colored Petri net models for distribution system service restoration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1073-1080.
- [15] FUKUYAMA Y, ENDO H, NAKANISHI Y. A hybrid system for service restoration using expert system and genetic algorithm[C]// International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, January 28-February 2, 1996, Orlando, USA: 394-398.
- [16] 周淙, 解慧力, 郑柏林, 等. 基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合[J]. 电网技术, 2015, 1(1): 136-142.
ZHOU Quan, JIE Huili, ZHENG Bolin, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation [J]. Power System Technology, 2015, 1(1): 136-142.
- [17] NAGATA T, SASAKI H, YOKOYAMA R. Power system restoration by joint usage of expert system and mathematical programming approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1473-1479.
- [18] 陈春, 汪泓, 刘蓓, 等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 55-60. DOI: 10.7500/AEPS20130618011.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. Network reconfiguration based on basic ring matrix and improved harmony search algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55-60. DOI: 10.7500/AEPS20130618011.
- [19] RAMOS E R, EXPÓSITO A G, SANTOS J R, et al. Path-based distribution network modeling: application to reconfiguration for loss reduction [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 556-564.
- [20] 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.
- [21] 国家电网公司. 配电网规划设计技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [22] 电力行业职业技能鉴定指导中心. 用电客户受理员[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

孙明(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 配电系统规划与运行、电力系统随机潮流。E-mail: 21510074@zju.edu.cn

董树锋(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智能电网优化与控制技术。E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn

夏圣峰(1985—), 男, 工程师, 主要研究方向: 配电网信息化、配电网运行。E-mail: 175702086@qq.com

(编辑 蔡静雯)

Path Description Based Calculation Method for Available Capacity of Feeder Partition Satisfied with $N-1$ Security Criterion

SUN Ming¹, DONG Shufeng¹, XIA Shengfeng², WU Hao¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Fuzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350009, China)

Abstract: Evaluation of feeder capacity is an important means to guaranteeing reliable operation of feeder. A method is proposed to calculate the available capacity of feeder partition satisfied with $N-1$ security criterion. Firstly, distribution networks at the same voltage level are divided into feeder partitions with automatic/manual switching devices as the boundary, which can be regarded as load nodes. The topology of the distribution network is described by all load nodes and all sets of power supply paths associated with load nodes. Taking path states as variables, the 0-1 linear programming model is developed to analyze $N-1$ security verification of feeders. To meet the practical marketing demand of the power supply company, by taking path states and the available capacity of feeder partition as variables, the mixed integer linear programming model is proposed to calculate the available capacity of feeder partition satisfied with $N-1$ security criterion. Finally, the calculation results of a practical 10 kV feeder group in a provincial capital show that the proposed method is practicable and effective.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2014AA051901).

Key words: power supply path; $N-1$ security verification; linear programming; available capacity