

DOI: 10.7667/PSPC180738

基于二进制粒子群算法的交直流混合配电网故障恢复方法

马天祥¹, 王春英², 贾静然¹, 段昕¹, 程肖³

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 河北创科电子科技有限公司, 河北 邯郸 056000; 3. 河北省送变电有限公司, 河北 石家庄 050051)

摘要: 针对交直流混合配电网特殊的网架结构和电气特性, 构建交直流混合配电网故障恢复模型。所提出的模型以故障恢复综合满意度指标为目标函数, 并计及潮流约束、节点电压约束、支路传输约束和网络辐射状约束等约束。对所建立的模型设计两阶段优化求解流程, 第一阶段采用二进制粒子群算法进行求解, 第二阶段采用粒子群算法进行求解。最后通过一个算例表明, 交直流混合配电网故障位置对故障恢复策略以及故障恢复综合满意度指标有着较大影响, 同时所提出的模型适用于交直流混合配电网故障恢复问题。

关键词: 交直流混合配电网; 故障恢复; 两阶段优化; 二进制粒子群算法

Fault recovery method for AC/DC hybrid distribution network based on binary particle swarm optimization algorithm

MA Tianxiang¹, WANG Chunying², JIA Jingran¹, DUAN Xin¹, CHENG Xiao³

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. Hebei Chuangke Electronics CO.LTD, Handan 056000, China; 3. Hebei Electricity Transmission & Transformation Facilities Company, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: According to the special grid structure and electrical characteristics of AC/DC hybrid distribution network, a fault recovery model of AC/DC hybrid distribution network is constructed. The proposed model takes the fault recovery comprehensive satisfaction index as the objective function, while considering the power flow constraint, the node voltage constraints, the branch transmission constraints, the network radiation constraint, and so on. A two-stage optimization process is designed to solve the established model. In the first stage, the binary particle swarm optimization is used to solve the problem, then the second stage optimization is solved by particle swarm optimization. Finally, an example shows that the fault location of AC/DC hybrid distribution network has a great influence on the fault recovery strategy and the fault recovery comprehensive satisfaction index, and it is applicable to the fault recovery of AC/DC hybrid distribution network.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. kj2018-063).

Key words: AC/DC hybrid distribution network; fault recovery; two-stage optimization; binary particle swarm optimization

0 引言

配电网故障恢复指配电网故障发生后, 通过确定最优的开关组合方案, 实现恢复失电负荷最多、开关操作次数最少、网损最小等目标, 同时满足恢复后配电网连通性、辐射状、馈线不过载等^[1-3]。随着直流负荷的应用越来越广泛, 交直流混合配电网

开始受到人们的重视, 通过交直流混合的主动配电网, 可以实现广域潮流范围内的能量调度, 这将是未来主动配电网^[4]的重要实现形式之一。

目前已有较多文献对配电网故障恢复问题进行了研究。例如文献[5]建立了基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复模型。文献[6]则是考虑了含光伏发电并网的配电网故障恢复模型, 并且计及了光伏出力的不确定性, 所建立的模型能够较好地应对这种情况。另外还有文献如文献[7]提出了配电

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(kj2018-063)

网故障恢复的区间数灰色关联决策方法。更多的文献则是寻求更高效的求解算法, 配电网故障恢复是一个多目标、多约束的非线性优化问题, 最终得到的解是一系列开关状态组合^[8]。例如传统的配电网故障恢复求解方法^[9]主要有启发式搜索方法和遗传算法^[10-11]、禁忌搜索算法^[12]、蚁群算法^[13]、多代理理论^[14]等智能优化方法。

然而以上文献所建立的模型针对的都是传统交流配电网, 目前还基本上没有文献针对交直流混合配电网建立其故障恢复模型。交直流混合配电网作为未来智能配电网的一种重要形式, 其故障恢复问题也是一门重要课题。模型中需要考虑的目标函数和约束条件都会有不同的形式。故障恢复模型的目标函数一般考虑有失电负荷量、网损功率以及开关操作次数, 交直流混合配电网故障恢复模型中网损的计算需要计及换流站支路的损耗, 另外直流支路的网损计算方式也不同; 交流配电网一般通过改变支路开关和联络线开关的状态进行故障恢复, 而交直流混合配电网还能通过改变换流站的状态进行故障恢复。在约束条件的建立中, 系统潮流约束需要计及直流网络, 而这也导致还需要额外计及直流网络的节点电压约束以及换流站支路的支路传输约束。

本文针对交直流混合配电网构建其故障恢复模型。该模型考虑了交直流混合配电网相比于传统交流配电网在故障恢复方法中所需计及的不同形式目标函数和约束条件。针对模型在求解上高维度、多变量、离散空间等难题, 采用二进制粒子群算法对模型设计两阶段求解流程。最后通过一个算例验证了本文方法的有效性, 能够适用于交直流混合配电网故障恢复问题。

1 交直流混合配电网故障恢复模型

1.1 交直流混合配电网结构

传统的交流配电网中只包含交流支路, 然而交直流混合配电网中不仅仅包含交流支路, 还包含直流支路以及换流支路。换流支路是指含换流站的连接系统交流网络和直流网络的支路, 能够将电能和交流和直流形式之间进行转化^[15]。因此交直流混合配电网在电气结构上最主要的特征是体现为一种分区断面特性, 其结构示意图如图1所示。

从图1中可以看出, 交直流混合配电网仍然是以交流部分为主体, 交流网络与外网通过公共耦合点连接, 这是系统获得电能的主要方式。整个系统以交直流断面区为分界线, 分为交流网络和直流网

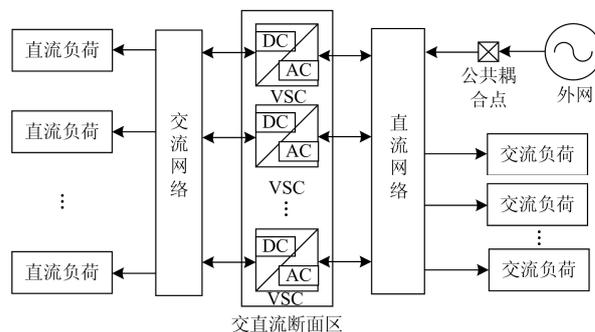


图1 交直流混合配电网分区结构示意图

Fig. 1 Sketch map of AC/DC hybrid distribution network partition structure

络, 其中, 交直流断面区指的是由换流站组成的换流支路。在这样的系统中, 交流负荷并网接入交流网络中, 同时直流负荷并网接入直流网络中。

1.2 目标函数

本文模型的目标函数采用故障恢复综合满意度指标, 该指标受到多方面因素的影响, 包括故障恢复后的系统供电负荷大小、开关操作次数、网损功率。该多目标函数的子目标一为最大化恢复后的供电负荷, 如式(1)所示。

$$\max f_1 = \sum_{j=1}^N u_j c_j P_j \quad (1)$$

式中: N 为配电网的负荷节点数; u_j 表示恢复后的配电网是否对第 j 个负荷节点进行供电, $u_j = 1$ 时表示进行供电, $u_j = 0$ 时表示不进行供电; c_j 表示第 j 个负荷节点的重要程度权重; P_j 表示第 j 个负荷节点的负荷水平。

子目标二为最小化交流开关和换流站支路直流断路器操作次数, 如式(2)所示。交直流混合配电网中的换流支路联络了交流节点和直流节点, 包含换流站和直流断路器。和交流支路一样, 其状态变化次数在目标函数中也需要计及。

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^M |k_i - g_i| + \sum_{j=1}^N |K_j - G_j| \quad (2)$$

式中: M 为配电网中交流开关数量; N 为配电网中直流开关数量; k_i 和 g_i 分别表示第 i 个交流开关在故障恢复前和故障恢复后的状态, 当 $k_i = 1$ 、 $g_i = 1$ 时表示开关闭合, 当 $k_i = 0$ 、 $g_i = 0$ 时表示开关断开; K_j 和 G_j 分别表示第 j 个交流开关在故障恢复前和故障恢复后的状态, 当 $K_j = 1$ 、 $G_j = 1$ 时表示开关闭合, 当 $K_j = 0$ 、 $G_j = 0$ 时表示开关断开。在模型中, 发生故障的线路开关状态必须为 0。

子目标三为最小化恢复后的配电网网损功率,如式(3)所示。与传统交流配电网只计及交流网损功率不同,该网损功率还需要计及换流站的功率损耗以及直流网络支路的功率损耗。

$$\min f_3 = P_{\text{loss}}^{\text{AC}} + P_{\text{loss}}^{\text{DC}} + P_{\text{loss}}^{\text{VSC}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{loss}}^{\text{AC}}$ 为交流网络的功率损耗; $P_{\text{loss}}^{\text{DC}}$ 为直流网络的功率损耗; $P_{\text{loss}}^{\text{VSC}}$ 为换流站功率损耗。以上损耗的表达式分别如式(4)一式(6)所示。

$$P_{\text{loss}}^{\text{AC}} = \sum_{i \in S_{\text{AC}}} [(P_{L,i})^2 + (Q_{L,i})^2] R_{L,i} / (U_{N,\text{AC}})^2 \quad (4)$$

式中: S_{AC} 表示配电网交流部分的馈线集合; $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 分别为第 i 条交流馈线在故障恢复后传输的有功和无功功率; $R_{L,i}$ 为第 i 条交流馈线的电阻; $U_{N,\text{AC}}$ 为配电网额定交流电压。

$$P_{\text{loss}}^{\text{DC}} = \sum_{j \in S_{\text{DC}}} (P_{L,j})^2 R_{L,j} / (U_{N,\text{DC}})^2 \quad (5)$$

式中: S_{DC} 表示配电网直流部分的馈线集合; $P_{L,j}$ 表示第 j 条直流馈线在故障恢复后传输的有功功率; $R_{L,j}$ 为第 j 条直流馈线的电阻; $U_{N,\text{DC}}$ 为配电网额定直流电压。

$$P_{\text{loss}}^{\text{VSC}} = \sum_{k \in S_{\text{VSC}}} (1 - \eta_k) P_{L,k} \quad (6)$$

其中, η_k 的表达式如式(7)和式(8)所示。

$$\eta_k = 100u / (0.004 + 1.002u + 0.018u^2) \quad (7)$$

$$u = \frac{P_{L,k}}{P_{N,k}} \quad (8)$$

式中: S_{VSC} 表示换流站支路集合; $P_{L,k}$ 为第 k 条换流站支路在故障恢复后传输的有功功率; η_k 为第 k 条换流站支路的换流效率,其表达式与第 k 条换流站支路的荷载率 u 有关; $P_{N,k}$ 为第 k 条换流站支路的额定传输功率。

采用多目标形式对以上几个子目标进行综合,采用故障恢复综合满意度指标来衡量多个子目标的综合达成程度,故障恢复满意度采用设定权值法计算如式(9)所示。

$$\max F = \lambda_1 \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \sum_{i=2}^3 \lambda_i \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (9)$$

式中: λ_i 为第 i 个子目标的权重; f_i^{\max} 和 f_i^{\min} 分别表示第 i 个子目标在以该子目标为单目标函数进行优化时所能取得的最大值和最小值。

对于子目标一恢复负荷,优化结果期望其越大越好,因此针对具体的一种配电网故障情况,在单

独考虑子目标一的情况下可以优化得到最大恢复负荷;但最小恢复负荷并不是优化得到的,最小恢复负荷即为交直流混合配电网发生故障后没有进行故障恢复的情况,即为 0。通过这样的方式只是为了设定子目标的合理区间,确保式(9)乘以系数前的第一项在满足[0,1]区间的前提下有一个合理的值。对于子目标二开关操作次数和子目标三系统网损,优化结果期望其越小越好,因此在单独考虑子目标二或者子目标三时能够优化得到其最小值,但是最大值并不是优化得到的,开关操作次数最大值取为系统所有的开关数量,最大网损功率可以选取为系统初始运行的网损功率。

1.3 约束条件

交直流混合配电网故障恢复模型需要考虑的约束条件包括:

1) 配电网故障恢复后辐射状约束。网络拓扑辐射状约束是为了防止系统出现环流从而对设备造成不良影响。因此传统交流配电网故障恢复后的系统网架结构需要满足辐射状约束,然而交直流混合配电网并不需要整个网络满足该约束,而只需要交流网络满足即可。该约束条件如式(10)所示。

$$\mathbf{g} \in \mathbf{G} \quad (10)$$

式中: 向量 \mathbf{g} 表示故障恢复后交流部分的拓扑结构, \mathbf{g} 由系统中每个交流开关状态变量组成; \mathbf{G} 为所有满足辐射状拓扑结构的配电网交流部分状态集合。

在模型求解中,因为组合爆炸的原因,不可能对所有的辐射状配电网拓扑结构进行枚举进而在求解中进行判断。本文采用广度优先搜索法^[16]对给定的一个交直流混合配电网交流部分进行辐射状拓扑判断,具体步骤如下:

(1) 从配电网中某个节点 n_0 出发,访问并记录。

(2) 依次访问与节点 n_0 相邻的各个未被访问的节点,并将被访问的节点进行记录。

(3) 分别从这些邻接节点出发,依次访问与这些节点相邻的未被访问的节点,直到所有的网络节点都被访问过为止。

(4) 如果还存在没有被访问过的节点,则说明故障恢复后的网络存在孤岛,那么在孤岛内进行着(1)、(2)、(3)所示同样的访问进程。

在以上的访问过程中,如果在某一步中访问的相邻节点出现在记录中,则说明网络结构中存在环网,如果未出现则说明网络结构满足该约束。

2) 系统潮流约束包括交流网络潮流约束和直流网络潮流约束。其中交流网络潮流平衡约束如式(11)和式(12)所示。

$$P_i - U_{i,AC} \sum_{j=1}^n U_{j,AC} (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (11)$$

$$Q_i - U_{i,AC} \sum_{j=1}^n U_{j,AC} (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (12)$$

式中: n 表示交流网络节点数; P_i 和 Q_i 分别表示第 i 个节点流入的有功和无功功率, 包括换流站支路流向交流侧节点的有功和无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 和 δ_{ij} 分别表示连接第 i 个和第 j 个交流节点线路的电导, 电纳以及电压相角差; U_i 和 U_j 分别表示第 i 个和第 j 个交流节点的电压幅值。

直流网络的潮流平衡约束如式(13)所示^[17]。

$$P_i = \sum_{j=1}^m B_{ij} \theta_j \quad (13)$$

其中, B_{ij} 的表达式如式(14)所示。

$$\begin{cases} B_{ii} = \sum_{j \in i, j \neq i} 1/x_{ij} \\ B_{ij} = -1/x_{ij} \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_i 为直流网络第 i 个节点注入的有功功率, 包括换流站支路流向直流节点的有功功率; m 为直流网络节点数。将以上直流潮流方程写成矩阵形式即为: $\mathbf{P} = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta}$, 其中 \mathbf{P} 为节点注入有功功率向量, $\boldsymbol{\theta}$ 为相角差向量, \mathbf{B} 为直流网络矩阵, 为一个 $m \times m$ 阶矩阵, B_{ii} 和 B_{ij} 表示矩阵 \mathbf{B} 中的元素, x_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间支路的电抗。

事实上, 如果故障恢复后的交直流混合配电网存在孤岛, 那么以上潮流平衡约束需要针对主网和每个孤岛都成立。

(3) 节点电压约束包括交流节点电压约束和直流节点电压约束, 分别如式(15)和式(16)所示。

$$U_{i,AC}^{\min} \leq U_{i,AC} \leq U_{i,AC}^{\max} \quad (15)$$

$$U_{j,DC}^{\min} \leq U_{j,DC} \leq U_{j,DC}^{\max} \quad (16)$$

式中: $U_{i,AC}$ 为第 i 个交流节点的电压幅值; $U_{i,AC}^{\min}$ 和 $U_{i,AC}^{\max}$ 分别表示第 i 个交流节点的电压幅值下限和上限; $U_{j,DC}$ 为第 j 个直流节点的电压幅值; $U_{j,DC}^{\min}$ 和 $U_{j,DC}^{\max}$ 分别表示第 j 个直流节点的电压幅值下限和上限。

(4) 支路容量约束如式(17)所示。

$$\begin{cases} -P_i^{\max} \leq P_i \leq P_i^{\max}, i \in S_{AC} \\ -P_j^{\max} \leq P_j \leq P_j^{\max}, j \in S_{DC} \\ -P_k^{\max} \leq P_k \leq P_k^{\max}, k \in S_{VSC} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_i^{\max} 表示第 i 条交流支路的功率传输上限;

P_j^{\max} 表示第 j 条直流支路的功率传输上限; P_k^{\max} 表示第 k 条换流站支路的功率传输上限。

2 算法与模型求解流程

在交直流混合配电网故障恢复模型的求解中, 控制变量包括各类支路开关的状态和节点供电负荷。然而在求解中并不适合将所有控制变量一起进行优化, 否则会面临开关状态和供电负荷不匹配的问题, 大大降低了求解效率。实际上, 系统进行的潮流计算以及供电负荷优化要基于各类开关状态给定后进行, 这样的优化模型具备明显的两阶段分步特征。因此本文将求解流程分步为两个阶段, 第一阶段优化各类开关状态变量, 第二阶段在第一阶段的基础上优化供电负荷量, 同时进行潮流计算, 向第一阶段反馈供电负荷量、网损功率以及开关变化次数。本文采用二进制粒子群算法和普通粒子群算法结合的混合智能算法对所建立的模型进行求解, 其中第一阶段采用二进制粒子群算法, 第二阶段采用粒子群算法。

2.1 第一阶段

第一阶段优化采用二进制粒子群算法, 传统优化模型中控制变量都是连续变量, 而交直流混合配电网故障恢复模型中控制变量为离散变量。二进制粒子群算法正适用于这样的离散空间优化问题^[18]。

二进制粒子群算法的速度更新公式如式(18)所示。

$$\mathbf{V}_i^{s+1} = \mathbf{V}_i^s + c_1 r_1 (\mathbf{p}_{\text{best},i}^s - \mathbf{X}_i^s) + c_2 r_2 (\mathbf{g}_{\text{best}}^s - \mathbf{X}_i^s) \quad (18)$$

式中: i 表示粒子的标号, 且有 $i=1, 2, \dots, N_p$, 其中 N_p 为种群的粒子总数; s 表示迭代代数; $\mathbf{p}_{\text{best},i}^s$ 表示第 i 个粒子到第 s 次迭代为止的个体极值点; $\mathbf{g}_{\text{best}}^s$ 表示整个种群到第 s 次迭代为止搜索到的全局极值点; \mathbf{V}_i^{s+1} 和 \mathbf{V}_i^s 分别为第 i 个粒子在第 $s+1$ 次和第 s 次迭代中的速度; \mathbf{X}_i^s 分别为第 i 个粒子在第 s 次迭代中的位置; c_1 、 c_2 是学习因子, 为两个正常数, 一般取值为 2; r_1 、 r_2 是两个均匀分布于 $[0,1]$ 之间的随机数。

在二进制粒子群算法中, 粒子位置中每一维变量均为二进制变量。而速度变量并不是表示粒子在该维上的运动速率, 而是影响粒子位置在该维度上在下一代取为 0 和 1 的概率大小。粒子位置更新公式如式(19)所示^[19]。

$$U_{i,d}^s = \begin{cases} 1 & r < \text{Sigmoid}(v_{i,d}^s) \\ 0 & r > \text{Sigmoid}(v_{i,d}^s) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $U_{i,d}^s$ 表示第 i 个粒子第 d 维在第 s 次迭代时的位置变量; r 为生成的随机数, 位于区间 $[0,1]$ 上; $v_{i,d}^s$ 表示第 i 个粒子第 d 维在第 s 次迭代时的速度变量, sigmoid 函数如式(20)所示。

$$\text{Sigmoid}(v_{i,d}^s) = \begin{cases} \frac{2}{1 + e^{-v_{i,d}^s}} & v_{i,d}^s > 0 \\ 1 - \frac{2}{1 + e^{-v_{i,d}^s}} & v_{i,d}^s < 0 \end{cases} \quad (20)$$

采用二进制粒子群算法对本文交直流混合配电网故障恢复模型设计第一阶段求解流程如下:

(1) 输入交直流混合配电网的故障预期消除时间范围、系统网架结构、故障点位置、节点负荷水平和支路阻抗等数据。

(2) 初始化二进制粒子群算法的种群(即故障恢复后的开关状态向量), 输入二进制粒子种群规模、最大迭代次数、学习因子和惯性权重。

(3) 采用恢复后辐射状约束中的广度优先搜索算法检测初始种群是否满足交直流混合配电网辐射状结构, 剔除不满足条件的个体。

(4) 调用第二阶段优化模型, 得到系统网损功率和供电负荷水平, 同时计算开关状态变化次数。根据以上结果计算第一阶段优化模型的目标函数, 进而得到每个粒子的适应度函数。

(5) 根据式(18)一式(20)更新二进制粒子的速度和位置。并更新全局最优粒子 $\mathbf{g}_{\text{best}}^s$ 和每个粒子最优 $\mathbf{g}_{\text{best}}^s$ 。

(6) 判断全局最优解是否收敛, 如果收敛则输出最优粒子对应的故障恢复方案, 算法结束, 否则返回(3)。

2.2 第二阶段

第二阶段优化采用粒子群算法, 目的是优化故障恢复后的供电水平。普通粒子群算法的速度更新公式同式(18)相同, 位置更新公式如式(21)所示。

$$\mathbf{X}_i^{s+1} = \mathbf{X}_i^s + \mathbf{V}_i^{s+1} \quad (21)$$

采用粒子群算法对本文交直流混合配电网故障恢复模型设计第二阶段求解流程如下:

(1) 输入故障恢复后的系统网架结构、节点负荷水平和支路阻抗等数据。

(2) 初始化粒子群算法的种群(即故障恢复后各个节点供电负荷), 输入粒子种群规模, 最大迭代次数、学习因子和惯性权重。

(3) 对交直流混合系统进行潮流计算, 得到系统网损功率和供电负荷水平, 并据此计算每个粒子的适应度函数。

(4) 根据式(18)和式(21)更新粒子的速度和位

置。并更新全局最优粒子 $\mathbf{g}_{\text{best}}^s$ 和每个粒子最优 $\mathbf{g}_{\text{best}}^s$ 。

(5) 判断全局最优解是否收敛, 如果收敛则向第一阶段优化反馈供电负荷和功率损耗, 算法结束, 否则返回(3)。

3 算例分析

3.1 算例设置

本文算例参考了文献[20]中交直流混合配电网的结构, 采用如图2所示的交直流混合配电网系统对本文的故障恢复模型进行验证。其中, 实心节点表示交流节点, 空心节点表示直流节点, 实线线路表示正常运行的线路, 虚线表示联络线。该系统以 IEEE33 节点系统为基础, 分别在节点 13、21、24、32 处接入换流站支路以及直流网络部分。

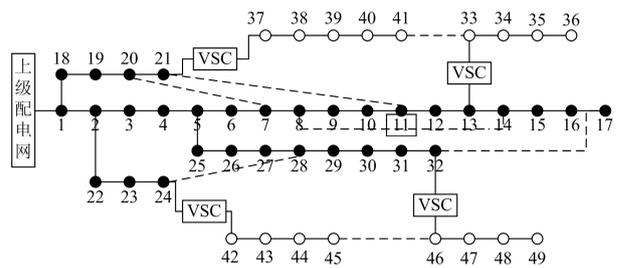


图2 基于 IEEE33 节点系统的交直流混合配电网网架结构图
Fig. 2 Network frame structure diagram of AC/DC hybrid distribution network based on IEEE33 system

拓展后的交直流混合配电网可以看作一个 49 节点系统, 其中, 节点 1 到节点 32 为交流节点, 节点 33 到节点 49 为直流节点。在系统中, 20-7, 21-11, 8-14, 24-28, 32-17 为交流联络支路, 41-33, 45-46 为直流联络支路, 这些支路在正常情况下断开, 在故障恢复时考虑联通。另外, 支路 21-37, 13-33, 24-42, 32-46 为换流站支路, 作为交流网络和直流网络的联系。此外, 交直流混合配电网通过公共连接点与外网或者上级配电网相连。

假设交直流混合配电网不含分布式发电的并网, 所有节点均为负荷节点。系统交流有功负荷为 3 715 kW, 无功负荷为 2 300 kvar, 直流负荷为 1 375 kW。根据负荷节点的重要程度将负荷分为三个等级, 配电网中的负荷分类情况具体如表 1 所示, 在故障恢复中, 模型要优先恢复重要程度高的负荷, 这点在目标函数中通过负荷权重系数体现。

本文算例设置三种方式下的配电网故障, 方式一为直流支路 38-39 发生故障, 方式二为交流支路 7-8 发生故障; 方式三为交流支路 4-5 发生故障。这样的故障可以是线路短路故障或者断相引起的线路跳闸。

表 1 交直流混合配电网节点负荷等级

Table 1 Importance classification of node load in AC/DC hybrid distribution network

负荷重要程度	负荷节点集合	权重系数
一级负荷	1, 2, 5, 7, 8, 13, 14, 22, 28, 37, 38, 41, 45, 46	1
二级负荷	3, 4, 6, 9, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 33, 34, 35, 40, 42, 47	0.5
三级负荷	10, 11, 12, 15, 16, 17, 29, 30, 31, 32, 36, 39, 43, 44, 48, 49	0.1

3.2 仿真结果

采用本文模型进行故障恢复, 得到方式一、方式二以及方式三下的故障恢复策略分别如表 2、表 3 和表 4 所示。

表 2 方式一下交直流混合配电网故障恢复方案

Table 2 Fault restoration scheme of the AC/DC hybrid distribution network in mode 1

故障支路	38-39
断开支路	无
合上支路	33-41
失电负荷节点	39
孤岛情况	无

从表 2 可以看出, 当直流支路 38-39 发生故障时, 该故障的破坏程度较低, 故障恢复策略也较为简单。将直流联络支路 33-41 合上, 直流负荷节点 40 和 41 共同由该支路进行供电。这种情况下对节点 40 和 41 供电的电能需要通过支路 1-13, 因此支路传输容量限制了节点 33 的供电能力, 所以不得不造成节点 39 成为失电负荷。然而这样的支路传输容量限制又不能通过合上联络支路 21-10 或者 20-7 的方式进行缓解, 因为这会造成交流网络部分出现回路, 不满足辐射状约束。

表 3 方式二下交直流混合配电网故障恢复方案

Table 3 Fault restoration scheme of the AC/DC hybrid distribution network in mode 2

故障支路	7-8
断开支路	8-9, 10-11, 16-17
合上支路	8-14, 21-11
失电负荷节点	9, 10, 17
孤岛情况	无

从表 3 可以看出, 当故障发生在支路 7-8 时, 其影响程度要大于方式一下的。由于支路 7-8 断开, 交直流混合配电网合上联络支路 21-11, 从而对节点 11 及后续节点供电。负荷节点 8 等级较高, 故障恢复策略中合上联络支路 8-14 从而对节点 8 供电。

由于支路传输容量的限制, 故障恢复策略中断开了对负荷等级较低的节点 9 和 10 以及末端负荷节点 17 的供电。由于对直流节点并没有造成供电紧张的影响, 因此直流联络支路和直流支路并没有发生状态改变的情况。

表 4 方式三下交直流混合配电网故障恢复方案

Table 4 Fault restoration scheme of the AC/DC hybrid distribution network in mode 3

故障支路	4-5
断开支路	9-10, 12-13, 14-15, 35-36, 47-48
合上支路	7-20, 8-14, 33-41, 45-46
失电负荷节点	10, 11, 12, 15, 16, 17, 48, 49
孤岛情况	无

从表 4 可以看出, 由于故障发生在距离上级配电网距离较近的 4-5 支路, 所以该故障对系统的不良影响也较大, 故障恢复策略较复杂。此时, 在满足交流网络辐射状约束的前提下, 交直流混合配电网充分利用了联络支路增强对末端负荷节点的供电能力。首先, 联络支路 20-7 合上, 相比于联络支路 21-11, 联络支路 20-7 连接到了负荷等级较高的节点 6, 7, 8 上, 联络支路 21-11 连接到的节点 10, 11, 12 负荷等级较低, 而这两条联络支路又由于辐射状约束的原因不能同时合上, 所以故障恢复模型选择了合上联络支路 20-7, 此时由于支路 4-5 故障断开, 所以不会导致环网。交流联络支路 8-14 也合上, 这是为了增强对末端节点的供电能力。节点 10, 11, 12 负荷等级较低, 成为了失电负荷节点, 从而节省下支路 1-18-19-20-7-8 的传输容量, 为末端负荷等级较高的节点供电提供保障。在这个过程中, 直流部分的一些联络支路合上, 增强了直流负荷节点之间的负荷转供能力。

从以上交直流混合配电网故障恢复方案可以看出, 本文交直流混合配电网故障恢复方案中并没有出现孤岛方案, 这是因为本文算例中交直流混合配电网中没有分布式能源的接入, 因此不可能出现某一区域内分布式能源对负荷节点单独供电形成功率平衡的情况。事实上, 以上三种故障方式下故障恢复相关指标比较如表 5 所示。

表 5 三种方式下故障恢复指标对比

Table 5 Index comparison of fault restoration scheme in three modes

故障恢复指标	方式一	方式二	方式三
失电负荷容量/kW	117.36	245.47	869.54
开关操作次数	1	5	9
系统网损功率/kW	183.45	176.94	165.74
故障恢复综合满意度	0.921 5	0.743 1	0.722 6

从表 5 可以看出, 三种故障方式下交直流混合配电网各项恢复指标不尽相同。方式一由于故障发生在末端直流支路, 对系统的影响较小, 因此失电负荷容量最小, 开关操作次数最小, 尽管系统网损功率由于运行支路多而高于其余两种方式下的, 但是故障恢复综合满意度在三种方式里还是最高的。方式三和方式二相比, 其故障支路距离交直流混合配电网与外网连接点更近, 因此更加严重。这导致方式三下失电负荷容量最高、开关操作次数最高、故障恢复综合满意度最低。

4 结论

交直流混合配电网在故障恢复方面的特殊之处在于需要全面计及交直流混合配电网特殊的电气运行特性导致的模型中各项目标函数和约束条件形式的不同, 也对模型求解方法有着更高的要求。本文针对交直流混合配电网故障恢复问题, 建立其故障恢复模型。所提出的模型更适用于交直流混合配电网故障恢复问题。本文设计的两阶段求解方法能够有效降低求解难度、提高求解效率, 更适用于交直流混合配电网故障恢复模型的求解。通过仿真算例表明, 故障位置的不同对故障恢复策略有着较大影响。故障支路距离公共连接点越近, 故障就越严重, 这将导致故障恢复策略中开关操作次数更多, 失电负荷越多, 故障恢复综合满意度指标越低。

参考文献

- [1] 吴志程, 江智军, 杨晓辉. 一种基于功率闭环控制的改进全局 MPPT 方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 57-62.
WU Zhicheng, JIANG Zhijun, YANG Xiaohui. An improved global MPPT method based on power closed loop control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 57-62.
- [2] 王艳松, 孙明鸿. 含微网配电网的综合优化规划研究[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 118-124.
WANG Yansong, SUN Minghong. Research on comprehensive optimization for distribution network with micro-grid[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 118-124.
- [3] 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.
PANG Qingle, GAO Houlei, LI Tianyou. Load balancing based fault service restoration for smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 342-348.
- [4] 任洪波, 邱留良, 吴琼, 等. 分布式能源系统优化与设计综述[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 49-55.
REN Hongbo, QIU Liuliang, WU Qiong, et al. A review of optimization planning and designing of distributed energy systems[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 49-55.
- [5] 王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等. 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 185-192.
WANG Zengping, YAO Yuhai, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 185-192.
- [6] 陈昕玥, 唐巍, 陈禹, 等. 基于机会约束规划含光伏发电的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 99-106.
CHEN Xinyue, TANG Wei, CHEN Yu, et al. Chance constrained programming based fault recovery of distribution network containing photovoltaic generations[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 99-106.
- [7] 臧天磊, 钟佳辰, 何正友, 等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 251-257.
ZANG Tianlei, ZHONG Jiachen, HE Zhengyou, et al. Service restoration of distribution network based on heuristic rules and entropy weight[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 251-257.
- [8] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50-54.
WU Wenchuan, ZHANG Boming. A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50-54.
- [9] 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, 31(10): 61-65, 81.
WANG Shouxiang, LI Xiaojing, XIAO Chaoxia, et al. Multi-agent approach for service restoration of distribution system containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 61-65, 81.
- [10] IRVING M R, LUAN W P, DANIEL J S. Supply restoration in distribution networks using a genetic algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(6): 447-457.
- [11] 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): 105-108.
GONG Weizheng, FANG Xinyan. Research of distribution system service restoration algorithm based on hybrid encoding[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 105-108.

- [12] SHIN D J, KIM J O, KIM T K. Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic-Tabu algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(2): 145-152.
- [13] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-55, 65.
ZHANG Zhao, FENG Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-55, 65.
- [14] 杨丽君, 刘建超, 曹良晶, 等. 基于黑板模型的配电网故障恢复多代理协作机制设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 85-89.
YANG Lijun, LIU Jianchao, CAO Liangjing, et al. Multi-agent coordinated mechanism design of distribution network fault restoration based on blackboard model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 85-89.
- [15] 李兴, 杨智斌, 颜远, 等. 考虑换流站损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 119-125.
LI Xing, YANG Zhibin, YAN Yuan, et al. Multi-objective reactive power optimal control of AC-DC systems including power loss characteristics of converter stations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 119-125.
- [16] 郑伟, 陈仕彬, 梁福波, 等. 基于 PSO-PSA 的光伏系统最大功率点跟踪技术[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 76-84.
ZHENG Wei, CHEN Shibin, LIANG Fubo, et al. Maximum power point tracking technology for photovoltaic systems based on PSO-PSA[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 76-84.
- [17] 敖鑫, 王淳, 蔡恒, 等. 计及接地支路的直流潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 8-15.
AO Xin, WANG Chun, CAI Heng, et al. DC power flow algorithm considering grounding branches[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 8-15.
- [18] 司徒友, 吴杰康, 郭清元, 等. 基于免疫 PSO 的新能源配电网无功多目标模糊优化[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 90-98.
- SITU You, WU Jiekang, GUO Qingyuan, et al. Multi-objective fuzzy optimization for reactive power of distribution network based on immune particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 90-98.
- [19] 赵越, 蒙毅, 李仁义. 基于粒子群优化算法分析约束条件对配煤最优价格的影响[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 99-104.
ZHAO Yue, MENG Yi, LI Renyi. Influence of constraints on optimal price of blending coal: by particle swarm optimization algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 99-104.
- [20] 康健, 靳斌, 段秀娟, 等. 基于贝叶斯-粒子群算法的微电网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 32-41.
KANG Jian, JIN Bin, DUAN Xiujuan, et al. Optimal operation of microgrid based on Bayesian-PSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 32-41.
- [21] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.

收稿日期: 2018-06-16; 修回日期: 2018-09-25

作者简介:

马天祥(1986—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事配电系统运行与控制、配网设备关键技术的研究工作; E-mail: matianxiang1986@126.com

王春英(1980—), 女, 本科, 工程师, 主要研究方向为配网设备技术与直流系统装置;

贾静然(1990—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为配电自动化设备监测。

(编辑 张爱琴)