

基于矩阵算法的主动配电网交直流混合网络供电恢复策略研究

唐学用¹, 韩玘桓², 李庆生¹, 黄玉辉², 赵庆明¹, 罗 宁¹

(1. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550033;

2. 上海金智晟东电力科技有限公司, 上海 200233)

摘 要:考虑到直流输电技术的发展, 直流配电应用于配电网中是未来配电网的研究重点。本文为解决主动配电网交直流混合网络的供电恢复问题, 提出含直流配电线路的主动配电网供电恢复方案, 当交流配电线路出现故障时, 考虑直流侧配电线路网损、换流器以及分布式电源影响下的供电恢复方案; 当直流配电线路出现故障时, 考虑转换直流侧运行方式或让失电的直流负荷转入计划孤岛运行模式, 以保证直流侧重要负荷的持续供电, 分别提出交流侧和直流侧约束条件, 并在约束条件下选取网络损耗、线路末端电压越限节点个数以及开关操作次数作为指标构建目标函数, 依据矩阵算法对供电恢复过程的不同恢复方案进行大数据分析与管理, 得出最优方案。通过改进的 IEEE 123 节点算例证明, 提出的方案能够有效的解决主动配电网的供电恢复问题。

关键词:主动配电网; 供电恢复; 直流配电线路; 矩阵算法; 大数据分析

文章编号:2096-4633(2019)10-0043-08 **中图分类号:**TM744 **文献标志码:**B

分布式电源和直流负荷通过直流配电线路接入交流配电网, 会有效提高主动配电网的供电效率, 但也会对配电网故障定位与非故障区供电恢复带来新的问题与挑战^[1-2]。随着分布式电源渗透率的日益提高, 通过划分孤岛由 DG 独立为失电负荷恢复供电可大大提高用户的供电可靠性^[3-5]。

文献[6]将一个常开/常闭开关对的操作视为一个阶段, 将配电网重构看作多阶段决策问题, 用动态规划的方法进行求解, 文献[7]提出一种改进的支路交换法, 根据实际负荷电流与理想转移负荷电流的差值大小确定打开的分段开关, 且一次操作可以实施多个独立拓扑调整, 提高了计算效率。文献[8]提出一种快速支路交换法, 根据最佳转移负荷的符号和大小确定能最大程度降低损耗的开关组合, 在重构过程中不需进行潮流计算, 显著提高了计算速度。文献[9]提出了结合二进制粒子群算法和离散粒子群算法的混合粒子群算法, 有效降低了无效粒子的产生概率, 文献[10]建立了配电网重构的多目标优化模型, 对于不同的温度采用不同的收敛指标, 提高了模拟退火算法的求解速度。但是直流配电线路加入配电网, 以及直流配电网接入分布式电源对供电恢复的影响, 使得传统的供电恢复算法不再符合新的要求。

因此, 本文提出改进的矩阵算法, 利用矩阵算法对多节点 DG 高渗透率的电网模型进行大数据分析。针对交直流混联配电网, 分别将交流侧和直流侧开关状态、末端电压及网损等网络数据矩阵化, 并应用矩阵间运算得到多目标优化模型, 对多个供电恢复策略进行数据的横向比较, 同时充分考虑直流线路加入传统配电网后对算法以及各节点潮流数据的影响, 提出故障恢复时直流侧的约束条件, 将直流线路的有功损耗和开关操作次数等数据作为直流侧故障恢复的重要指标, 并通过直流侧故障和换流器故障验证算法的可行性, 算例结果表明, 改进的矩阵算法可以有效的处理多节点大电网供电恢复时的大量数据, 并通过配电网交直流侧的分层分类, 对恢复后的大数据进行分析, 得到有效的供电恢复策略。该方法已体现在贵州电网公司科技项目(067600KK52170015)贵州电网主动化管理与评估体系研究。

1 交直流配电线路供电恢复考虑

配电网供电恢复的目标是在允许的操作条件和电气约束下, 通过网络重构尽可能多地将停电区域的负荷转供到正常的馈线上^[11]。实际情况下, 配网调度员应快速的恢复供电, 同时, 考虑到开关操作寿命和有限的人力资源, 要求开关的操

作次数越少越好。

当直流配电网出现故障后,经过故障定位,隔离等步骤将故障切除,故障点下游的负荷失电也被切除,随后恢复直流侧供电,这种处理方法可以使直流侧大部分负荷稳定运行,但失电负荷被切除后,无法再进行并网运行,使失电负荷区域处于停电状态。本文提出两种供电恢复方法:第一种通过改变直流配电网的运行方式来进行直流配电网的供电恢复,尽量减少直流侧的失电负荷量;第二种利用直流配电线路中的分布式电源,建立孤岛,使失电的直流负荷恢复供电。

2 配电网供电恢复策略与算法

2.1 目标函数

针对目标函数可选取的指标有:配电网网络损耗,开关操作次数,失电负荷量,负荷均衡等^[11-12]。本文选取网络损耗、线路末端电压越限节点个数和开关操作次数作为目标函数。除此之外,配电网需要满足辐射状网络拓扑约束,电压约束,线路容量约束等约束条件,结合传统交流配电网供电恢复时的约束条件,本文提出直流配电网需要满足的约束条件。

$$f = w_1 \frac{\sum_{i=1}^M P(i)}{\sum_{i_0=1}^{M_0} P(i_0)} + w_2 \frac{\sum_{j=1}^S L(j)}{\sum_{j_0=1}^{S_0} L(j_0)} + w_3 \frac{\sum_{k=1}^N K(k)}{N} \quad (4)$$

式中: $P(i)$ 为供电恢复后节点的网络损耗, $P(i_0)$ 为供电恢复前节点的网络损耗; $K(k)$ 用来表示第 k 号开关是否动作,若动作则 $K(k) = 1$, 否则 $K(k) = 0$; $L(j)$ 为供电恢复后越限节点总数; $L(j_0)$ 为供电恢复前越限节点总数; N 为开关总数; w_1 、 w_2 、 w_3 为 3 个目标的权重系数。

定义 3 个系数的取值分别为: $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.1$, $w_3 = 0.4$, 整个恢复过程以网络损耗和开关操作次数最少为主要目标,因此权重系数 w_1 、 w_2 的取值最大;本文考虑到直流侧供电恢复时,改变其运行模式,对开关操作影响较大,所以开关操作次数将作为供电恢复策略的必要考虑因素。

2.2 约束条件

2.2.1 交流配电线路约束条件

(1) 电压约束

定义电压偏差函数:

$$f = \min \sum \left| \frac{U_j - U_{jN}}{U_{jN}} \right| \quad (5)$$

2.1.1 网络损耗

$$\min P = \sum_{j=1}^M \left(\frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2} \right) r_j k_j \quad (1)$$

式中: M 为配电网中的支路总数; V_j 为支路 j 的末端电压; r_j 为支路 j 的电阻; P_j 、 Q_j 分别为流过支路 j 的有功功率和无功功率; k_j 表示支路 j 上开关的状态,断开为 0、闭合为 1。

2.1.2 线路末端电压越限节点个数

$$f = L(j) \text{ JY} \quad (2)$$

式中, $L(j)$ 为供电恢复后线路末端越限节点的个数;

2.1.3 开关操作次数

$$\min f_1(F) = \text{sum}(A - A_0) \quad (3)$$

其中: F 为供电恢复后的配电网; A 为供电恢复后配电网网络拓扑的邻接矩阵; A_0 为故障后配电网网络拓扑的邻接矩阵; 对其内的元素取绝对值后, $\text{sum}()$ 表示对括号内矩阵的所有元素累加。

本文将网络损耗、线路末端电压越限节点个数以及开关操作次数作为指标,通过加权求和的方式构建目标函数如下:

要求电压的波动范围为 $\pm 5\%$ 。

(2) 供电恢复的可用供电容量限制

$$\sum_{r \in F_q} P_r x_r \leq G_q \quad q \in S \quad (6)$$

式中: P_r 为流过支路 r 的功率; x_r 为 1 或 0,为支路 r 的决策变量, $x_r = 1$ 表示支路 r 包含于恢复路径; F_q 为以母线 q 为起始节点的支路集合; G_q 为从带电母线 q 可获得的恢复功率; S 为与失电区域相连的带电母线集合。

(3) 支路容量限制条件

$$|P_k| \leq P_{k\max} \quad (7)$$

式中, P_k 为流过支路 k 的功率; $P_{k\max}$ 为支路 k 的最大容量。

(4) 功率平衡

$$\sum_{k \in T_i} P_k = \sum_{k \in F_i} P_k + L_i Y_i \quad (8)$$

式中: T_i 为向母线 i 供电的支路数。

(5) DG 功率约束

DG 的注入功率不应超过 DG 的最大容量。

2.2.2 直流配电线路约束条件

(1) 直流网络方程

$$\begin{bmatrix} I_{d1} \\ -I_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^{-1} & -R^{-1} \\ -R^{-1} & R^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{d2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, R 为直流输电线路电阻; V_{d1} 、 V_{d2} 、 I_{d1} 、 I_{d2} 分别为直流系统整流侧和逆变侧的直流电压和电流。

(2) 供电恢复时, 负荷削减前后功率因数等式方程

潮流方程应有如下考虑: 当节点没有连接换流器时, 该节点的潮流方程是交流系统的普通潮流方程; 当节点 i 接有换流器 k 时, 原来的潮流方程就要加入换流器的等效注入功率:

$$\begin{cases} P_{dci} = V_{dk} I_{dk} \\ Q_{dci} = V_{dk} I_{dk} \tan \varphi_k \end{cases} \quad (10)$$

(3) 直流系统的不等式约束

直流系统的不等式约束包括换流站的直流电压与直流电流约束、换流变压器变比约束和换流器控制角约束, 即:

$$\begin{cases} V_{dk}^{\min} \leq V_{dk} \leq V_{dk}^{\max} \\ I_{djk}^{\min} \leq I_{djk} \leq I_{djk}^{\max} \\ k_{T_k}^{\min} \leq k_{T_k} \leq k_{T_k}^{\max} \\ \theta_k^{\min} \leq \theta_k \leq \theta_k^{\max} \end{cases} \quad i \in S_d \quad (11)$$

式中, S_d 为所有换流器节点的集合, θ_k 为换流器的控制角, 对应整流器的触发延迟角或逆变器的熄弧角。

2.3 算法步骤

如果把配电网中的每条馈线都当作是一条无向边或者是一条弧, 假如配电网网络结构中的节点数为 N , 则用一个阶矩阵对配电网结构进行描述, 该矩阵记作 D , 则矩阵 D 称为网基结构矩阵^[13]。

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \cdots & d_{NN} \end{bmatrix} \quad N \times N \quad (12)$$

如果节点 i 与 j 中有一条馈线连接即一条边, 则 $d_{ij} = d_{ji} = 1$, 否则 $d_{ij} = d_{ji} = 0$ 。

在网基中, 如果网络中节点总数为 N , 建立各节

点的描述矩阵如下所示。

(1) 源点分布矩阵由一个含 N 个元素的行矩阵 A 表示, $A = [a_1, a_2, \cdots, a_N] 1 \times N$, 如果节点 i 是源点, 则 $a_i = 1$, 否则 $a_i = 0$ ^[14]。

(2) 耦合点 (T 节点) 分布矩阵由一个含 N 个元素的行矩阵 T 表示, $T = [t_1, t_2, \cdots, t_N] 1 \times N$, 如果节点 i 是耦合点, 则 $t_i = 1$, 否则 $t_i = 0$ 。

(3) 末梢点分布矩阵由一个含 N 个元素的行矩阵 B 表示, $B = [b_1, b_2, \cdots, b_N] 1 \times N$, 如果节点 i 是末梢点, 则 $b_i = 1$, 否则 $t_i = 0$ 。

(4) 节点状态矩阵由一个含 N 个元素的行矩阵 M 表示 $M = [m_1, m_2, \cdots, m_N] 1 \times N$ 。如果节点 i 处在闭合状态, 则 $b_i = 1$, 否则 $b_i = 0$ 。

(5) 线路有功功率, 无功功率损耗矩阵: 假设网络中 W 条线路, 线路有功功率损耗矩阵 $P = [p_1, p_2, \cdots, p_w] 1 \times w$, 是由一个含 W 个元素的行矩阵, 线路无功功率损耗矩阵是由一个含 W 个元素的行矩阵 $Q = [q_1, q_2, \cdots, q_w] 1 \times W$ 。

(6) 开关状态矩阵: 设网络中 W 条线路, 开关状态矩阵由一个含 W 个元素组成的行矩阵表示 $F = [1, 1, \cdots, 0, 1, \cdots, 1] 1 \times W$, 其中, 元素 1 表示线路上的开关处于闭合状态, 元素 0 表示线路上的开关处于断开状态。

根据 2.1 节中选取的目标函数, 需要计算系统的网络损耗, 开关操作次数, 线路末端电压越限节点个数。网络中的线损通过如下公式进行计算:

$$K = \frac{PR + QX}{U^2} R \quad (13)$$

网络中的变压器损耗通过如下公式进行计算:

$$\Delta P_z = \Delta P + K_0 \cdot \Delta Q \quad (14)$$

因此, 系统中的网络损耗为线路损耗加变压器损耗。

开关操作次数通过比较供电恢复前后开关状态矩阵中元素的变化次数, 得到开关的操作次数。

线路末端电压越限节点个数通过仿真图得出。

针对含有备用电源的线路主干, 若备用电源大于等于两个, 优先选取备用容量大的电源进行供电恢复; 若系统发生多个故障, 无法同时处理, 则需要对每个故障单独分析逐个处理^[15-18]。非故障区停电负荷转移框图如图 1 所示。

3 算例分析

利用 DIgSILENT/PowerFactory 软件对配电网的供电恢复进行仿真验证。根据 IEEE123 节点标准算例进行修改,用于改进配电网的潮流分析,并利用模型数据制定供电恢复方案。下面对该算例修改进行说明。

(1)节点 80~85 所在区域改为直流供电,节点 52~66 所在区域改为直流供电。

(2)在节点 62,64 处增加分布式电源风机 1 和风机 2。

(3)在节点 55,57 处增加燃料电池 1 和 2。

以改进 IEEE 123 节点配电网作为算例,其拓扑结构如图 2 所示。该配电系统的总负荷为 $3\,489\text{ kW} + \text{j}1\,545\text{ kvar}$,交流侧额定电压为 10.7 kV ,直流侧额定电压为 20 kV 。在该配电系统中引入 DG,DG 的具体接入节点以及功率如表 1 所示,节点类型为 PQ 节点。换流器 VSC3 采用 $V_{\text{dc}}Q$ 控制,VSC1、VSC2 和 VSC4 采用 PQ 控制。

假设改进的 IEEE 123 节点配电系统中交流侧线路 76~86 处和 VSC2 发生永久性故障,提出以下三种供电恢复方案。方案一:断开开关 76~86,断开 VSC2 两端开关,闭合联络开关 16~95;方案二:断开开关 76~86 断开 VSC2 两端开关,闭合联络开关 13~95;方案三:断开开关 76~86,断开 VSC2 两端开关,闭合联络开关 13~95 和联络开关 67~87。供电恢复前后的配电网参数及恢复结果见表 2。

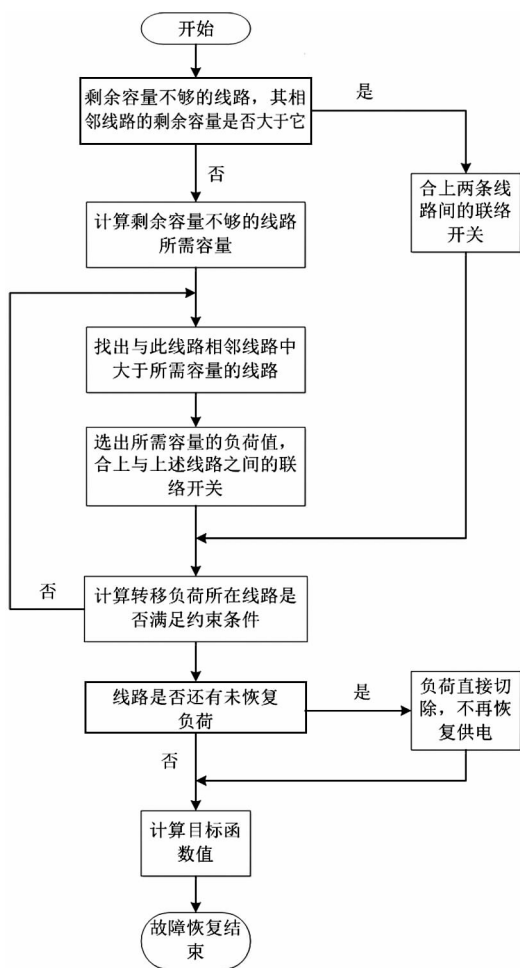


图 1 非故障区停电负荷供电恢复流程图

Fig. 1 Flow chart of power supply recovery for power failure load in Non-fault zone

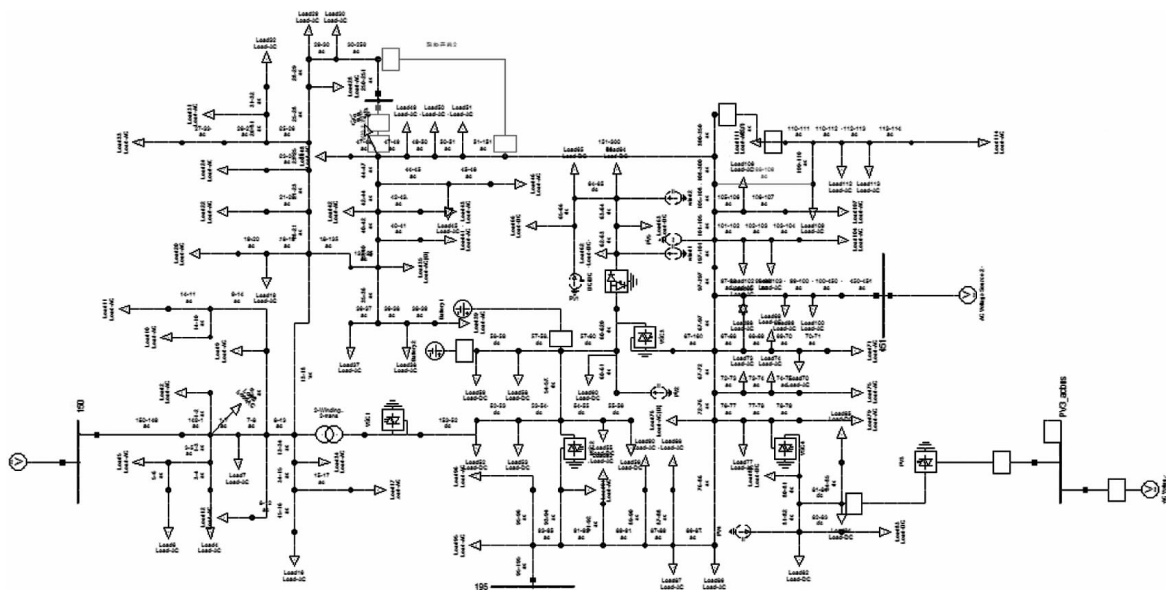


图 2 模型仿真图

Fig. 2 Model simulation diagram

表 1 配电网区域分布式电源接入情况

Tab. 1 Distributed power access in distribution network regional

配电网	接入点	DG	容量/kVA	$P_{\text{mpp/kw}}$	$P_{\text{r/kw}}$	实际功率
直流配网	66	PV1	250	200		196
	61	PV2	150	100		98
	84	PV3	100	50		49
	82	PV4	100	50		49
	62	Wind1	200		200	150
	64	Wind2	150		150	100
	57	Battery	150			100
	55	FC	100			50
交流配网	101	PV5	200	100		96.06
	108	MT	250			150

表 2 供电恢复结果

Tab. 2 Power restoration results

	供电恢复前	方案一	方案二	方案三
开关操作	断开开关 76 – 86, VSC2 两端开关	闭合联络开关 16 – 95	闭合联络开关 13 – 95	闭合联络开关 13 – 95 和联络开关 67 – 87
开关操作次数	3	1	1	2
停电负荷节点	86,87,88,90,92,94,95,96	无	无	无
停电负荷总功率	340 kW + 170 kvar	0	0	0
最低节点电压	9.431 479 kV	9.424 561 kV	9.424 582 kV	9.650 168 kV
线路末端电压越限节点数	4	0	0	0
目标函数值		0.988 059	0.983 6	0.741 9

由表 2 可知,交流侧 76 – 86 处和 VSC2 发生永久性故障时,故障点下游的负荷节点均将受到停电影响。在供电恢复后,停电负荷节点由原来的 8 个减少到 0 个,线路末端电压越限节点由 5 个减少到 0 个。

首先比较方案一和方案二,二者的目标函数值相差不大,但方案二相对较小,仿真结果与 13 – 18 处供电恢复结果相似,因此可以得出结论:由于联络开关 13 – 95 接于系统的主干线上,联络开关 16 – 95 接于系统的支路上,通过闭合与系统主干线相连的联络开关,来达到供电恢复要求的方案,要比闭合支路上联络开关的恢复方案更优。

其次,重点分析方案三与方案一、二的区别,方案三考虑将非故障区停电负荷进行双端恢复供电,

闭合两联络开关,虽然开关操作次数增加,增加了联络开关所在线路的网损,但整个系统的网络损耗大大减少,目标函数值明显降低,所以在交流侧 76 – 86 处和 VSC2 发生永久性故障时,选择方案三对供电恢复的处理效果更优。

假设改进的 IEEE 123 节点配电系统中直流侧线路 60 – 620 处发生永久性故障,若不考虑孤岛运行与恢复重构,直流侧负荷 62 – 66 以及直流 – 直流换流器均被切除,系统中其他设备和负荷正常运行,若考虑孤岛运行与恢复重构,可将负荷 62 – 66 与风机 1、风机 2、光伏 1 组成计划孤岛,一旦线路 60 – 620 或其上游线路出现故障导致负荷 62 – 66 停止供电,便可启动孤岛运行模式,供电恢复前后的配电网参数及恢复结果见表 3。

表 3 供电恢复结果

Tab. 3 Power restoration results

	供电恢复前	方案一	方案二
开关操作	断开开关 60 – 620	切除负荷 62 – 66	计划孤岛运行
开关操作次数	1	0	0
停电负荷节点	62 – 66	62 – 66	无
停电负荷总功率	370 kW	370 kW	0
最低节点电压	8. 519 6 kV	9. 457 6 kV	9. 457 6 kV
线路末端电压越限节点数	4	0	0
目标函数值		0. 52	0. 52
交流线路网损/kV		978. 526	978. 526
直流线路网损/kV		42. 309	43. 285

由表 3 可知,切除负荷 62 – 66 是系统处理直流侧故障最直接的供电恢复策略,但切除的直流负荷无法恢复供电,如果负荷等级较高,这种策略对经济以及社会的负面影响是巨大的,因此,考虑计划孤岛运行,风机 1、风机 2 和光伏 1 恒定输出 2 000 kW 的功率,利用其中分布式电源与负荷 62 – 66 组成孤岛,恢复负荷 62 – 66 的供电。

假设改进的 IEEE 123 节点配电系统的直流配电网 1 中直流线路 152 – 52、换流器 VSC2 与节点 54

间的直流线路以及 VSC3 与节点 60 间的直流线路均发生单极接地故障,故障定位和隔离后,有两种恢复方案,方案一:将直流配电网 1 的运行模式由双极运行转换为单极运行,此时,直流配电网 1 中的所有直流线路均需要开关操作转换其运行模式;方案二:将直流配电网 1 转换为孤岛运行模式,由分布式电源 PV2 对孤岛进行供电。

故障恢复前后的配电网参数及恢复结果见表 4 所示。

表 4 供电恢复结果

Tab. 4 Power restoration results

	供电恢复前	方案一	方案二
开关操作	断开 VSC1、VSC2、VSC3 与直流配电网间的开关	运行模式转换,双极运行转换为单极运行	计划孤岛运行
开关操作次数	3	9	3
停电负荷节点	52 – 60	无	无
停电负荷总功率	180 kW	0	0
最低节点电压/kV	8. 700 5	9. 572 6	9. 326 1
线路末端电压越限节点数	4	0	0
目标函数值		0. 81	0. 96
交流线路网损/kV		703. 241	728. 607
直流线路网损/kV		36. 899	71. 291

针对此算例,选择方案一更好。若故障引起大面积直流负荷失电,由双极运行转换为单极运行则

需要大量的开关操作,目标函数值会迅速增加;若目标函数中开关操作次数所赋予的权重最高,则对于

开关操作次数少的方案,其目标函数值会更小。因此需结合实际情况,选取合适的目标函数及权重,获得相应的最优恢复方案。

4 结语

本文提出矩阵算法对交直流配电线路进行故障恢复,针对改进的 IEEE123 节点算例,分别对交流侧和直流侧潮流计算后,进行大数据分析处理,得出如下结论:

(1) 本方法能够实现交流侧故障下的供电恢复,故障位置数目的不同,会得到不同的供电恢复方案,均能恢复失电负荷,具有较强的实际应用。

(2) 交直流混联电网由于节点多,系统复杂多样,供电恢复方案需处理数据量大,通过矩阵算法可简化数据处理过程,得到有效的目标函数值。

(3) 改进的矩阵算法能够实现直流线路故障下的供电恢复,通过改变直流侧运行方式或采用直流计划孤岛运行,减少失电负荷量。

(4) 对于直流配电线路,如果不改变直流配电网的运行方式,可以考虑分级控制的方式对直流侧进行供电恢复,需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 郭森林,刘俊勇,魏震波,等. 配电网供电能力研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(01):33-43.
GUO Yanlin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Load supply capability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(01): 33-43.
- [2] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(02): 1106-1115.
- [3] HAFEZ A A, OMRAN W A, HEGAZY Y G. A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(03): 1911-1919.
- [4] 卢人杰,邹晓松,袁旭峰. 含分布式能源的主动配电网规划研究[J]. 贵州电力技术, 2015, 18(01): 58-61+76.
LU Renjie, ZOU Xiaosong, YUAN Xufeng. Study on the active power distribution network planning of distributed energy[J]. Guizhou Electric Power Technology. 2015, 18(01): 58-61+76.
- [5] 戴庆华,晏治喜,漆铭钧,等. 智能配电网大数据典型应用场景研究[J]. 电力大数据, 2018, 21(11): 43-49.
DAI Qinghua, YAN Zhixi, QI Mingjun, et al. Research on typical application scenario of big data in smart distribution network[J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(11): 43-49.
- [6] 易海川,张彼德,王海颖,等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. 电网技术, 2016, 40(05): 1431-1436.

- YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al. Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. Power System Technology, 2016, 40(05): 1431-1436.
- [7] 杨丽君,张广超,吕雪姣,等. 考虑可控负荷的含分布式电源配电网短时故障供电恢复[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 11-17+26.
YANG Lijun, ZHANG Guangchao, LV Xuejiao, et al. Power restoration considering controllable load for short-time fault of distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 11-17+26.
- [8] CHEN C, WANG J, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(02): 958-966.
- [9] F. CAPITANESCU, L. F. OCHOA, H. MARGOSSIAN, et al. Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power System, 2015, 30(01): 346-356.
- [10] LI J, MA X Y, LIU C C, et al. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(06): 3021-3029.
- [11] 丛伟,盛亚如,咸国富,等. 基于智能配电终端的分布式供电恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 77-85+237-239.
CONG Wei, SHENG Yaru, XIAN Guofu, et al. Distributed power Service Restoration Method Based on Smart Terminal Unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 77-85+237-239.
- [12] 茅逸斐,韩蓓,李国杰,等. 基于网络等效的配电网快速供电恢复策略并行化实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 99-108.
MAO Yifei, HAN Bei, LI Guojie, et al. Parallel realization of fast restoration strategy for distribution system based on network equivalent[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 99-108.
- [13] 王晶,陈骏宇,金华锋. 含分布式电源的配电网动态孤岛划分博弈模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 14-24.
WANG Jing, CHEN Junyu, JIN Huaifeng. A game model of dynamic island partition for distribution network with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 14-24.
- [14] 金明亮,李会新,谢俊,等. 基于规则式的多重故障诊断及最优送电路径策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(04): 176-181.
JIN Mingliang, LI Huixin, XIE Jun, et al. Rule based intelligent fault diagnosis and recovery power delivery algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(04): 176-181.
- [15] 阮贺彬,高红均,刘俊勇,等. 考虑 DG 无功支撑和开关重构的主动配电网分布鲁棒无功优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(03): 685-695+948.

- RUAN Hebin, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. A distributionally robust reactive power optimization model for active distribution network considering reactive power support of DG and switch reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(03): 685 – 695 + 948.
- [16] GIANNELOS S, KONSTANTELOS I, STRBAC G. Option value of soft open points in distribution networks [C]//2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2015: 1 – 6.
- [17] 周淦, 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, 39(01): 136 – 142.
ZHOU Quan, XIE Huili, ZHENG Bolin, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation[J]. Power System Technology, 2015, 39(01): 136 – 142.
- [18] 陈祺炜, 蒋平, 仇晨光, 等. 计及 VSC-HVDC 的交直流系统负荷恢复优化[J]. 广东电力, 2018, 31(01): 68 – 73.
CHEN Qiwei, JIANG Ping, QIU Chenguang, et al. Load restoration optimization of AC/DC system considering VSC-HVDC[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(01): 68 – 73.

收稿日期: 2019 – 09 – 11

作者简介:



唐学用(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事主动配电网运行控制、电网规划、新能源电力系统方面的工作。

(本文责任编辑: 范 斌)

Research on power supply recovery strategy of AC/DC hybrid network based on matrix algorithm in active distribution network

TANG Xueyong¹, HAN Qihuan², LI Qingsheng¹, HUANG Yuhui², ZHAO Qingming¹, LUO Ning¹

(1. Power Grid Planning and Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550033 Guizhou, China;

2. Shanghai Wiscom Sunest Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Considering the development of DC transmission technology, the application of DC power distribution in distribution networks is the focus of future distribution network research. In order to solve the power supply recovery problem of AC/DC hybrid network in active distribution network, The article proposes an active distribution network power restoration scheme with DC distribution lines. When an AC distribution circuit failure occurs, the power restoration scheme will be considered under the influence of network loss, inverter, and distributed power supply on the DC side of the distribution network; When a fault occurs on the DC distribution circuit, consider converting the DC-side operation mode or transferring the de-energized DC load to the planned island operation mode to ensure continuous power supply for important DC-side loads. The AC side and DC side constraints are proposed separately, and the network loss and line terminal voltage overrun are selected under the constraints. The number of points and the number of switching operations are taken as indicators to construct the objective function, according to the matrix algorithm, big data analysis and processing are performed on different recovery schemes of the power restoration process, and the optimal solution is obtained. Through the improved IEEE123 node calculation example, the proposed scheme can effectively solve the power restoration problem of active distribution networks.

Key words: active distribution network; power supply restoration; direct-current distribution circuit; matrix algorithm; big data analysis