

DOI: 10.7667/PSPC161302

## 考虑时间尺度的含 DG 配电网故障动态恢复策略

齐 郑<sup>1</sup>, 张首魁<sup>1</sup>, 李 志<sup>1</sup>, 张红颖<sup>1</sup>, 郑宇航<sup>1</sup>, 黄哲洙<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110811)

**摘要:** 提出了考虑分布式电源(Distributed generation, DG)随时间变化的动态模型来解决含分布式电源的配电网故障恢复问题。实际情况中不同类型 DG 的实时输出功率随时间变化, 考虑将时间尺度拉长, 进行多时段的动态故障恢复。选取故障恢复时段内损失电量之和最小为主要目标函数, 开关操作次数最少作为次要目标函数。该算法首先利用改进二进制粒子群算法(Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)求得辐射状网络结构, 排除大量不可行解, 然后利用所提出的基于最优故障恢复路径策略进行切负荷操作。最后通过枚举组合对最小开关次数进行求解, 得出最优的开关操作方案。算例结果证明, 进行配电网故障恢复时考虑主网和 DG 的动态配合, 能够最大限度恢复供电。

**关键词:** 分布式电源; 时间尺度; 动态恢复; 改进二进制粒子群算法; 切负荷

### Dynamic service restoration strategy considering time scale for distribution network with DGs

QI Zheng<sup>1</sup>, ZHANG Shoukui<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>1</sup>, ZHANG Hongying<sup>1</sup>, ZHENG Yuhang<sup>1</sup>, HUANG Zhezhu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Liaoning Provincial Power Grid Corp, Shenyang Power Supply Company, Shenyang 110811, China)

**Abstract:** A model considering time variation of distributed generation (DG) is proposed here and successfully applied to solving fault recovery problem in distribution network. According to the actual situation that real-time output power of different types of DGs keeps changing over time, multi-period dynamic service restoration based on tensile time scales is considered. A minimum summation of load loss in the restoration period is selected as the main objective function, and the minimum number of switching operations as the secondary objective function. Firstly, the improved binary particle swarm optimization is applied to obtain radial network structure excluding a large number of infeasible solutions. Secondly, the strategy based on optimal recovery path proposed in this paper is used to perform load shedding operation. Lastly, the minimal switch operation problem is solved by enumeration-combination method, then the optimal service restoration switch scheme is eventually obtained. The example shows that maximized service restoration can be achieved with the dynamic coordination between the main grid and DGs.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. KJ[2013]896).

**Key words:** distributed generation; time scale; dynamic restoration; improved binary particle swarm optimization; load shedding

## 0 引言

配电网承担着重要的电能分配任务, 目前我国配电网结构愈趋复杂, 庞大的配电系统不可避免地会出现故障, 对人们的生活造成一系列的影响。传统配电网故障恢复的主要目标是在最短的时间内通过网络重构来尽可能对故障区域负荷进行恢复<sup>[1-2]</sup>。

近年来各类分布式发电技术均在飞速发展, DG 在实际电网中的应用也变得愈加方便<sup>[3-4]</sup>, 这使得将 DG 用于故障恢复变得更为可行。由于 DG 与传统电网中的电源特性不同, 所以不能简单地作同样的处理。国内外学者对包含分布式电源的供电恢复这一课题做了大量的研究工作, 目前国内外常见的方法主要包括启发式搜索算法<sup>[5-6]</sup>、专家系统<sup>[7-8]</sup>、Petri 网算法<sup>[9]</sup>、遗传算法<sup>[10]</sup>、蚁群算法<sup>[11]</sup>和粒子群算法<sup>[12-14]</sup>等。

基金项目: 国家电网公司科技项目 (KJ [2013] 896 号)

文献[15]考虑了 BDG(Black-start DG) 和 NBDG(Non Black-start DG)的区别, 却未能考虑到 DG 的出力变化; 文献[16]提出了一种能使配电网重构和孤岛划分合理配合的恢复策略, 重构和孤岛划分的结果共同影响全局最优解。文献[17]提出了“区间数”这一概念来描述分布式电源出力的不确定性和负荷容量的波动并基于此考虑了短时间的故障恢复, 但是对于长时间故障恢复其算法并不适用; 文献[18]考虑了含光伏发电的配网故障恢复, 但最终仍将光伏的出力以概率收敛为一个恒定值, 忽略了光伏一天中随光照强度变化而产生的出力波动。

以往的模型和算法均存在着明显的不足, 即忽略了 DG 出力变化的影响, 将故障恢复置于一个“时间断层”上考虑。实际运行情况下, 各种类型 DG 的输出功率随着光照强度、风速和出力时间的变化处于不断波动的状态, 所以在时间断层上考虑的静态故障恢复难以满足随时变化的运行调度的需求。

本文研究了考虑时间尺度的含 DG 配电网故障动态恢复策略。考虑故障后 DG 孤岛运行和孤岛并网的情况, 将时间尺度拉长, 考虑 DG 在整个恢复时段上的出力变化情况, 建立配电网故障动态恢复模型。该模型以整个恢复时段内的失电量之和最小为主要目标函数、以故障恢复方案的开关操作次数最少为次要目标函数, 采用改进二进制粒子群算法结合基于最优故障恢复路径的切负荷规则对主要目标函数进行求解, 通过枚举组合对次要目标函数进行求解。算例结果表明, 本文建立的模型更加贴近实际工程运行情况, 提出的算法能够对该模型进行有效的求解, 快速准确地解决含 DG 的配电网动态故障恢复问题。

## 1 分布式电源系统模型

### 1.1 分布式发电系统运行方式

下面对本文出现的分布式发电系统的运行方式进行概述。

有两个途径通过逆变器接入电网对负载进行供电: 方式一为分布式发电系统发出电能直接接到逆变器; 方式二为分布式发电装置将电能存储到储能系统, 在之后的时段由储能系统通过逆变器接入电网给负载供电。由于实际储能装置充放电效率一定小于 1, 所以通常不存在储能系统在充电过程中同时向负荷供电, 即①和②的控制不会同时闭合。如图 1 所示。

### 1.2 分布式电源系统数学模型

光伏发电输出功率经验计算公式<sup>[19-20]</sup>为

$$P(t) = \alpha AS \quad (1)$$

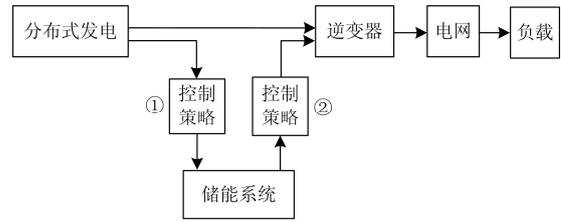


图 1 分布式发电系统运行方式

Fig. 1 Operation mode of distributed generation system

式(1)中:  $P_m(t)$  为光伏发电功率;  $\alpha$  为光电转换效率经验值;  $A$  为太阳能电池板面积;  $S$  为太阳能辐射度。

储能装置的充放电模型十分复杂, 本文选用铅蓄电池作为储能装置, 其在正常运行区间内的充放电模型可以简化为线性模型, 简化后的充电模型为

$$E(t+1) = E(t) + P_c(t) \cdot h \quad (2)$$

放电模型为

$$E(t+1) = E(t) - P_{dc}(t) \cdot h \quad (3)$$

式中:  $E(t)$  是  $t$  时段末的储能剩余电量;  $P_c(t)$  为  $t$  时段的充电功率;  $P_{dc}(t)$  为  $t$  时段的放电功率;  $h$  为一个时段的时长。

约束条件为

$$P_c(t) \leq P_{c,max} \quad (4)$$

$$P_{dc}(t) \leq P_{dc,max} \quad (5)$$

$$E_{min} \leq E(t) \leq E_{max} \quad (6)$$

式中:  $P_{c,max}$  和  $P_{dc,max}$  分别为储能装置的最大充电、放电功率;  $E_{min}$  和  $E_{max}$  为储能装置最小和最大剩余电量限额。

## 2 考虑时间尺度的配电网故障动态恢复

在对配电网进行故障恢复的过程中, 调度运行人员的首要任务是快速将尽量多的负荷恢复供电, 经济运行问题可以摆在次要位置, 所以在恢复过程中, 可以采用电流代替负荷的方式来计算, 由电流的叠加来表示潮流分布, 以此满足快速计算的要求。

将动态故障恢复时间尺度拉长后, 由于 DG 供电能力不断波动, 在不同的时段内也将产生不同的恢复方案(本文暂不考虑负荷变化, 如果负荷变化, 本文所提方法同样适用)。假设网络内共有  $M$  个可操作开关, 将恢复分为  $T$  个时段进行, 开关状态解空间的大小将上升到  $2^{MT}$ , 所以解空间大小将随着恢复时间的增加呈指数增长。考虑到在现场的实际故障恢复过程中, 故障恢复负荷量目标比开关的操作次数目标重要, 本文选取恢复时段内恢复供电负荷量之和最大(即断电负荷量之和最小)为首要目标函数, 选取故障恢复方案的开关操作次数最少为次

要目标函数。所以为了简化和优化计算, 将多时段动态供电恢复划分为两个阶段, 以下对这两阶段进行详细阐述。

### 2.1 恢复电量最大

优先考虑主网和光伏出力为负荷供电, 为下一时段的故障恢复提高裕度, 即从第 1 时段失电量最少的方案中选取储能剩余电量最大的恢复方案, 并据此开关状态和储能剩余电量状态得到第 2 时段的恢复方案, 以此类推, 得到故障恢复过程中各个分时段内的备选开关解集。

由此可在第一阶段将多目标数学模型简化为分时段数学模型如下。

$$\min f_1(X_t) = \sum_{o \in \Omega_0} P_{t,o} - \sum_{a \in \Omega_A} P_{t,a} \quad (7)$$

$$\max f_2(X_t) = \sum_{d=1}^D E_d(t) \quad (8)$$

式中:  $f_1(X_t)$  为  $t$  时段  $X_t$  网架结构运行方式下的损失负荷量;  $\Omega_0$ 、 $P_{t,o}$  分别为故障前负荷集合和负荷  $o$  的负荷量;  $\Omega_A$ 、 $P_{t,a}$  分别为故障恢复后正常供电区域内的负荷集合和  $t$  时段内第  $a$  个负荷的负荷量;  $f_2(X_t)$  为  $t$  时段末储能剩余总电量;  $E_d(t)$  为第  $d$  个储能装置的剩余电量;  $D$  为配电网内储能装置总数量。

求解配电网故障动态恢复的问题, 即求解配电网开关集合解向量的问题, 约束一般包含以下部分。

(1) 支路电流约束

$$I_i \leq I_{i\max} \quad i=1, 2, 3, \dots, b \quad (9)$$

式中:  $b$  为网架内总的支路数;  $I_i$  为流经第  $i$  条支路的电流;  $I_{i\max}$  为第  $i$  条支路的电流容量限额。

(2) 节点电压约束

$$U_{j\min} \leq U_j \leq U_{j\max} \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

式中:  $n$  为网架内总的节点数;  $U_j$  为节点  $j$  的电压;  $U_{j\min}$  为保证其能够正常运行的最小节点电压;  $U_{j\max}$  为保证其能够正常运行的最大节点电压。

(3) 辐射状网架约束

$$g \in G \quad (11)$$

式中:  $g$  为网架结构;  $G$  为不计 DG 时的辐射状网架结构集。不计及 DG 时, 配电网呈严格辐射状网络运行。

对第一阶段目标函数的求解方法将在第 3 节中详述。

### 2.2 开关操作次数最少

从对 2.1 节求解得到的每个分时段备选拓扑解集中选择一个解, 得出整个故障恢复时段的恢复

方案组合, 列举出整个恢复时段的所有恢复方案, 即枚举组合出所有可能的恢复方案, 选择开关动作次数最少的操作方案作为全局最优解。由此可建立以下数学模型。

$$\min f_3(X) = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M |S_{t,m} - S_{t-1,m}| \quad (12)$$

式中:  $f_3(X)$  为恢复方案开关操作总次数;  $X$  为抽取单时段操作方案得到的多时段操作方案组合;  $t=1, \dots, T$ ,  $T$  为故障恢复时段数, 当  $t=1$ ,  $t-1=0$  时表示故障恢复前时段;  $m=1, \dots, M$ ,  $M$  为所求配电网中的开关总数;  $S_{t,m}$  为第  $m$  个开关在  $t$  时段的状态, 其值取 0 表示开关处于断开状态, 取 1 表示开关处于闭合状态。

## 3 含 DG 配电网故障动态恢复优化算法

### 3.1 改进二进制粒子群算法求解辐射状网络结构

基本 BPSO 算法应用于网络重构时一般用粒子位置为 0 表示支路开断, 粒子位置为 1 表示支路闭合, 其速度和位移迭代公式分别为

$$v_{i,d}^{n+1} = \omega v_{i,d}^n + c_1 r_1^n (P_{ibest} - x_{i,d}^n) + c_2 r_2^n (G_{best} - x_{i,d}^n) \quad (13)$$

$$\begin{cases} x_{i,d}^{k+1} = 1 & r_{and} < S(v_{i,d}^{k+1}) \\ x_{i,d}^{k+1} = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

粒子各维的取值为 0 或 1 的概率取决于 Sigmoid 函数, 即:

$$S(v_{id}^k) = 1 / (1 + e^{-v_{id}^k}) \quad (15)$$

如果利用基本 BPSO 算法直接求解, 在经过式 (13)、式 (14) 迭代过后, 网架拓扑结构会出现环网或孤岛, 导致不可行解几率大大提高, 因此本文采用将 BPSO 算法与拓扑识别结合的改进算法, 利用 Sigmoid 函数值选择断开支路(消除环网), 即将该维置 0, 利用拓扑识别将断开支路所在支路组的剩余支路开关闭合(避免孤岛), 即将该维置 1, 保证得到的解均为可行解。

在本文中, 采用改进 BPSO 算法求解开关位置, 步骤为

- 1) 设置粒子初始速度, 计算 Sigmoid 函数值。
- 2) 进行支路组的等效合并<sup>[21]</sup>, 将与环网主体结构无关的支路强行置 1 且不参加之后的迭代。
- 3) 选择环网主体支路中 Sigmoid 的函数值最小的支路置 0, 将其所在支路组的其他支路强行置 1。
- 4) 取出断开支路组, 从剩下的环网主体支路中选择 Sigmoid 函数值最小的支路断开, 将其所在支路组的其他支路置 1。

5) 重复步骤(3)直至断开 $\lambda$ 条支路组( $\lambda$ 为环网结构的环数),生成辐射状网架结构。

### 3.2 切负荷策略

在利用改进 BPSO 算法得出辐射状网络拓扑后,可能会出现支路电流越限,此时需要进行切负荷操作。本文提出了基于最优故障恢复路径的切负荷步骤为

1) 在完成网络重构后,配电网将呈辐射状运行(不计及DG的影响),每个辐射网均由一个电源进行供电,计算辐射网中越限支路的越限量(即实际载流量超出额定载流量的部分) $X$ 。

2) 以越限支路的下游节点为根节点,向下游遍历搜索至所有叶子节点,形成拓扑网络,称之为恢复树。

3) 从恢复树 $tr$ 的各个叶子节点 $tr_{end,e}$ 分别向上游深度搜索,直到搜索到 $node.e$ 节点,使叶子节点 $tr_{end,e}$ 到 $node.e$ 的负荷量之和超过越限量 $X$ ,此路径称为恢复树 $tr$ 的第 $e$ 条故障恢复路径。

4) 将各个故障恢复路径内的负荷按其节点层次大小排序,采用基于最优故障恢复路径的切负荷策略列出切断负荷集合。

5) 建立故障恢复路径开关档案,将故障恢复路径上每个开关(即节点间支路)按照其上游节点的节点层次大小排序写入故障恢复路径开关档案,一旦开关控制负荷量超过越限量或此路径上所有负荷均被写入,则此路径的档案写入终止,开始写下一路径的开关档案,直到所有故障恢复路径的开关档案全部写入。

6) 在取切断负荷集合时,首先查看开关档案每条路径末端的开关控制负荷是否大于越限量,若大于越限量,则将断开此开关列为备选切除方案,并将此开关从开关档案删除,否则不进行任何操作。

7) 然后进行开关的遍历组合,规则为每条故障恢复路径中最多断开一个开关。若方案中存在相同开关则删去其中一个;若存在上下级关系,则将下级开关从切除方案中删除。若方案中切除了 DG,则将进行孤岛划分<sup>[22-23]</sup>并将恢复量计入切断负荷量,否则不计入。

8) 选择切除负荷量大于越限量的方案进行切除负荷量的排序,选择其中切负荷量最小的方案,即为最优故障恢复路径。

### 3.3 算法流程

算法流程图如图 2 所示。

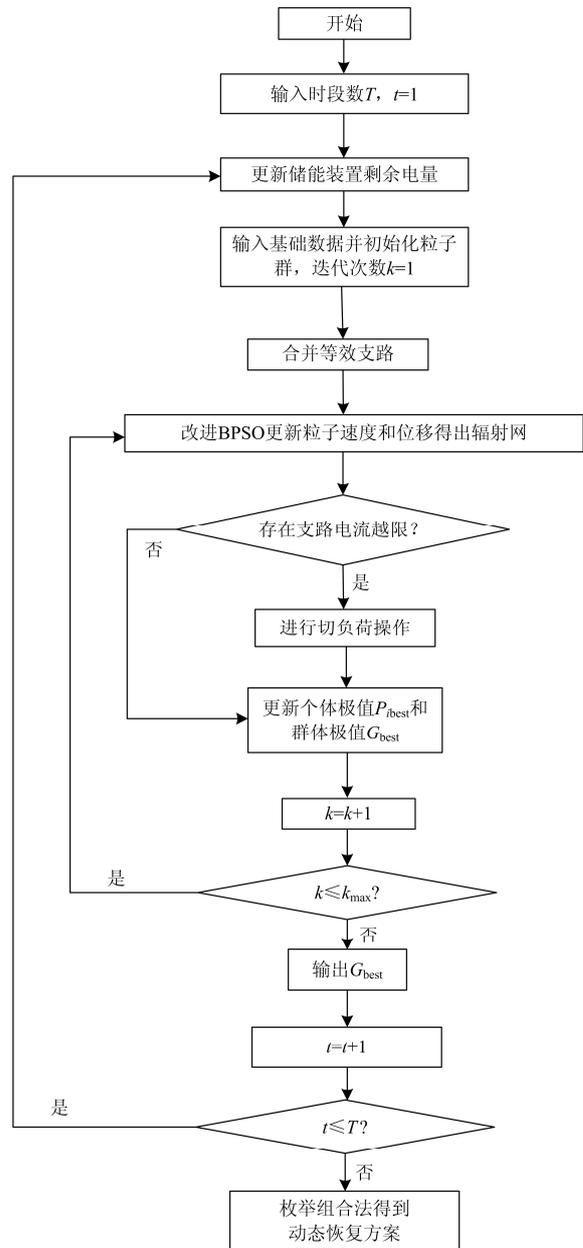


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm process

具体流程为

- 1) 设定整个故障恢复方案的恢复时段数  $T$ 。
- 2) 更新储能装置剩余电量,输入基础数据,如节点负荷矩阵、支路阻抗矩阵、节点—支路关联矩阵、故障发生时刻和恢复时间等;初始化粒子群,设置算法参数例如种群规模、粒子位置维数(即配电网支路开关数)、惯性因子  $\omega$ 、学习因子  $c_1$  和  $c_2$ 、最大速度限值、最大迭代次数等。
- 3) 合并等效支路,得到支路组。
- 4) 利用改进二进制粒子群算法进行网络重构,

得到辐射网可行解。

5) 判断是否存在支路违反支路电流约束, 若存在则进行切负荷操作。

6) 从失电量最小的方案中选取储能剩余总量最大的方案以更新个体极值和全局极值。

7) 判断迭代次数  $k$  是否超过迭代次数上限, 若不是, 则继续进行迭代, 否则, 停止迭代并输出群体最优解。

8) 判断时段数  $t$  是否超过上限, 若不是, 则重复步骤 5) 步骤 8), 否则, 依第 2.2 节所述枚举组合得到故障动态恢复方案并将其输出。

## 4 算例验证

### 4.1 算例参数

图 3 为对某实际配电网<sup>[24]</sup>进行简化并加入了 DG 后的网架结构, 标号为负荷编号, 负荷容量见表 1, 该配电网共包含 5 个分布式电源, 其中  $DG_1$  为铅蓄电池组,  $DG_2$ 、 $DG_3$ 、 $DG_4$  为光伏发电系统,  $DG_5$  为柴油发电机。分布式电源参数如表 2 所示, 光伏出力标幺值如表 3 所示。储能装置最大、最小 SOC 分别为 0.9 和 0.3。正常运行时支路 3-4、8-10、15-16 和 15-20 断开,  $DG_1$ 、 $DG_3$  和  $DG_5$  不参与运行。设定该配电网中每条馈线的额定电流容量均为 300 A, 假设母线 101 发生故障导致断路器  $S_1$  和  $S_2$  断开, 其带的负荷由母线 102 和母线 103 进行转供。故障恢复时间设定为 4 h。

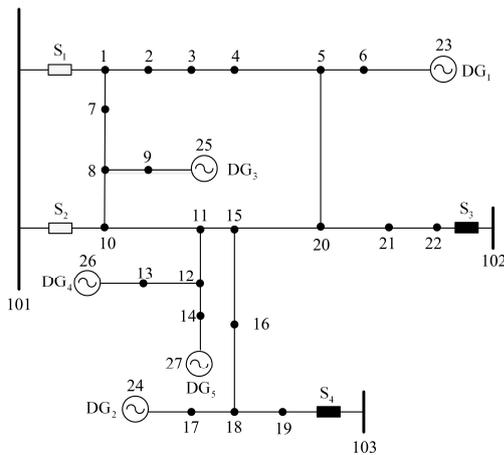


图 3 某县城关含 DG 配网简化图

Fig. 3 A simplified figure of distribution system with DGs in some county suburb

### 4.2 算例结果

本文在如图 3 的拓扑结构上设置 3 个故障情景, 如表 1—表 3 所示。

情景一: 断路器  $S_1$ 、 $S_2$  在早上 7 点断开, 到上午 11 点抢修完毕, 故障前储能 SOC 均为 0.9;

表 1 算例负荷量

Table 1 Load capacity in the example

负荷编号	负荷量/A	负荷编号	负荷量/A
1	25	12	25
2	28	13	31
3	48	14	38
4	59	15	31
5	19	16	56
6	33	17	34
7	19	18	78
8	26	19	46
9	37	20	58
10	25	21	49
11	28	22	25

表 2 分布式电源参数

Table 2 Parameters of DGs

节点编号	类型	光伏额定容量/A	储能额定容量/Ah	最大充/放电功率/A
23	铅蓄电池	—	70	20
24	光储系统	20	10	5
25	光储系统	50	50	20
26	光储系统	100	100	50
27	柴油发电机	—	—	50

表 3 某典型日光伏出力标幺值

Table 3 PV output per unit in a typical day

时段	光伏出力标幺值	时段	光伏出力标幺值
00:00—01:00	0	12:00—13:00	0.825
01:00—02:00	0	13:00—14:00	0.712
02:00—03:00	0	14:00—15:00	0.614
03:00—04:00	0	15:00—16:00	0.515
04:00—05:00	0	16:00—17:00	0.295
05:00—06:00	0	17:00—18:00	0.116
06:00—07:00	0.096	18:00—19:00	0
07:00—08:00	0.403	19:00—20:00	0
08:00—09:00	0.581	20:00—21:00	0
09:00—10:00	0.694	21:00—22:00	0
10:00—11:00	0.824	22:00—23:00	0
11:00—12:00	0.853	23:00—24:00	0

情景二: 断路器  $S_1$ 、 $S_2$  在 7:00 断开, 到 11:00 抢修完毕, 故障前储能 SOC 均为 0.5;

情景三: 断路器  $S_1$ 、 $S_2$  在上午 10:00 断开, 到 14:00 抢修完毕, 故障前储能 SOC 均为 0.5。

根据本文模型和算法, 可得到各情景最优动态恢复方案如表 4—表 6 所示(注:  $PB_1$  为铅蓄电池  $DG_1$ ;  $PB_2$ 、 $PB_3$ 、 $PB_4$  分别为光储系统  $DG_2$ 、 $DG_3$  和  $DG_4$  配备的的铅蓄电池储能。“PB 剩余电量”指本时段末剩余电量)。

表 4 情景一动态恢复方案

Table 4 Dynamic restoration scheme for situation 1

时段	拓扑结构 (分闸)	失负 荷号	失负 荷量/A	PB <sub>1</sub> 出力/A	PB <sub>1</sub> 剩余 电量/Ah	PB <sub>2</sub> 出力/A	PB <sub>2</sub> 剩余 电量/Ah	PB <sub>3</sub> 出力/A	PB <sub>3</sub> 剩余 电量/Ah	PB <sub>4</sub> 出力/A	PB <sub>4</sub> 剩余 电量/Ah	DG <sub>5</sub> 出力/A
7:00—8:00	1-2,1-7,15-20	1	25	19	44	3.699	5.301	14.797	30.203	36.994	53.006	50
8:00—9:00	1-2,1-7,15-20	1	25	19	25	1.433	3.868	9.469	20.734	14.328	38.678	50
9:00—10:00	1-2,1-7,2-3,15-20	1,2	53	-9	34	0.342	3.526	2.259	18.475	3.419	35.259	50
10:00—11:00	1-2,2-3,15-20	2	28	-9	43	0.507	3.019	3.347	15.128	5.066	30.193	50

总损失电量为 131 Ah(1310 kWh), 开关操作次数为 7 次, DG 共出力 759 Ah。

表 5 情景二动态恢复方案

Table 5 Dynamic restoration scheme for situation 2

时段	拓扑结构 (分闸)	失负 荷号	失负 荷量/A	PB <sub>1</sub> 出力/A	PB <sub>1</sub> 剩余 电量/Ah	PB <sub>2</sub> 出力/A	PB <sub>2</sub> 剩余 电量/Ah	PB <sub>3</sub> 出力/A	PB <sub>3</sub> 剩余 电量/Ah	PB <sub>4</sub> 出力/A	PB <sub>4</sub> 剩余 电量/Ah	DG <sub>5</sub> 出力/A
7:00—8:00	2-3,7-8,8-9, 9-25,15-20	1,2,7, 9	109	-9	44	1.785	3.215	-20	45	17.855	32.145	50
8:00—9:00	1-2,7-8,15-20	1,7	44	19	25	0.06	3.155	5.572	39.428	0.598	31.547	50
9:00—10:00	1-7,2-3,15-20	1,2	53	-9	34	0.043	3.112	5.548	33.88	0.429	31.118	50
10:00—11:00	1-2,2-3,15-20	2	28	-9	43	0.05	3.062	8.374	25.506	0.496	30.622	50

损失电量 234 Ah, 开关操作次数为 17 次, DG 共出力 665 Ah。

表 6 情景三动态恢复方案

Table 6 Dynamic restoration scheme for situation 3

时段	拓扑结构(分闸)	失负 荷号	失负 荷量/A	PB <sub>1</sub> 出力/A	PB <sub>1</sub> 剩余 电量/Ah	PB <sub>2</sub> 出力/A	PB <sub>2</sub> 剩余 电量/Ah	PB <sub>3</sub> 出 力/A	PB <sub>3</sub> 剩余 电量/Ah	PB <sub>4</sub> 出力/A	PB <sub>4</sub> 剩余 电量/Ah	DG <sub>5</sub> 出力/A
10:00—11:00	1-2,2-3,15-20	2	28	-9	44	0.558	4.442	2.788	22.212	5.574	44.426	50
11:00—12:00	1-2,15-20	-	0	19	25	0.249	4.193	1.247	20.965	2.494	41.932	50
12:00—13:00	1-2,2-3,15-20	2	28	-9	34	0.547	3.646	2.734	18.231	5.469	36.463	50
13:00—14:00	1-2,1-7,2-3,15-20	1,2	53	-9	43	0.185	3.461	0.925	17.306	1.85	34.613	50

损失电量 109 Ah, 开关操作次数为 8 次, DG 共出力 790 Ah。

### 4.3 算例分析

#### 1) 时间尺度对供电恢复的影响

从情景一、情景二、情景三的恢复方案可以看出, 光伏出力随一天中时刻不同变化, 铅蓄电池状态由上阶段的方案决定, 若将其出力在不同时刻均按照同一个定值做考虑, 做出的恢复方案无法应用于配电网实际的故障恢复。而利用本文提出的模型和算法可以求得能够实际应用的最优动态恢复方案, 验证了本文模型和算法的准确性。

#### 2) 故障时刻对供电恢复的影响

对比情景二和情景三, 由于光伏发电的最大出力与故障时刻相关, 所以在初始时刻储能装置荷电状态相同的情况下, 故障发生在 7:00 和 10:00 点的恢复方案和结果均不同。并且 7:00—11:00 点所有光伏输出能量(425.34 Ah)比 10:00—14:00 点所有光伏输出能量(546.38 Ah)少 121.04 Ah, 但情景二损失电量(234 Ah)比情景三损失电量(109 Ah)多 125 Ah, 两者的差异说明故障时刻影响到可供用于恢复方案

的供电量, 直接决定了分布式电源间出力的配合, 成为恢复方案的关键因素之一。

#### 3) 储能 SOC 对供电恢复的影响

情景一和情景二均为 7:00 发生故障, 区别在于初始时刻储能 SOC 不同。对比可知, 初始时刻储能 SOC 对于故障方案和恢复结果有重要影响(相差 103 Ah), 在恢复过程中优先使用主网和光伏出力对负荷供电以保存铅蓄电池剩余电量, 为下一时段进行故障恢复提供余量显得极为重要。

## 5 结论

1) 考虑了不同类型 DG 出力方式的配合, 将其纳入到供电恢复模型, 考虑将时间尺度拉长的多时段恢复模型代替以往传统只考虑时间断层的模型, 此模型更准确、更贴近实际。

2) 采用改进二进制粒子群算法, 本文提出的基于最优故障恢复路径的切负荷策略和枚举组合法对动态恢复模型进行求解, 设置合适的粒子规模和最

大迭代次数可保证快速取得最优解。

3) 若预设的故障发生时刻不同或储能荷电状态不同, 供电恢复的结果和方案大不相同。因此, 考虑含分布式电源的动态恢复时, 故障发生时刻和初始时刻储能荷电状态所需时间均需要考虑。正常运行时提高储能装置荷电量有利于故障恢复时更多恢复用电量。

## 参考文献

- [1] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 148-154.  
LIU Li, CHEN Xuefeng, ZHAI Denghui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 148-154.
- [2] 杨丽君, 于琦, 魏玲玲, 等. 基于移动多代理动态联盟的配电网故障恢复研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 147-155.  
YANG Lijun, YU Qi, WEI Lingling, et al. A distribution network fault recovery study on the dynamic alliance of mobile multi-agent[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 147-155.
- [3] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 44(1): 85-91.  
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2015, 44(1): 85-91.
- [4] FENG L, ZHANG J, LI G, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-9.
- [5] 刘强, 石立宝, 倪以信, 等. 电力系统恢复控制的网络重构智能优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 8-15.  
LIU Qiang, SHI Libao, NI Yixin, et al. Intelligent optimization strategy of the power grid reconfiguration during power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 8-15.
- [6] 刘健. 变结构耗散网络——配电网自动化新算法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 106-110.
- [7] 杨成峰, 乐秀璠. 配电网故障恢复专家系统的一种实现[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(11): 28-31.  
YANG Chengfeng, LE Xiufan. An implementation of service restoration expert system for power distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 28-31.
- [8] PARK Y M, LEE K H. Application of expert system to power system restoration in sub-control center[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 629-635.
- [9] 马骞, 杨以涵, 刘文颖, 等. 基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复方法[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 23-28.  
MA Qian, YANG Yihan, LIU Wenyong, et al. Method of power system restoration based on object-oriented Petri-net technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 23-28.
- [10] 田昊, 吕林, 高红均, 等. 计及电网运行特性的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-14.  
TIAN Hao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-14.
- [11] WATANABE I. An ACO algorithm for service restoration in power distribution systems[C] // 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation: IEEE, 2005, 3: 2864-2871.
- [12] 姚玉海, 王增平, 郭昆亚, 等. 基于 E 占优的多目标二进制粒子群算法求解配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 76-81.  
YAO Yuhai, WANG Zengping, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration using a multi-objective binary particle swarm optimization based on E-dominance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 76-81.
- [13] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.  
WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 73-78.
- [14] 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.
- [15] 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.  
LU Zhigang, DONG Yuxiang. Service restoration

- strategy for the distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 89-92.
- [16] 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(1): 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(1): 136-142.
- [17] 李志铿, 王钢, 陈志刚, 等. 基于区间潮流的含分布式电源配电网故障恢复算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 53-58.  
LI Zhikeng, WANG Gang, CHEN Zhigang, et al. An interval load flow algorithm for service restoration in distribution network with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 53-58.
- [18] 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.
- [19] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.  
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [20] 高英, 谢开贵, 胡博, 等. 考虑光伏出力与负荷相关性的光伏电站容量可信度评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 1-6.  
GAO Ying, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Photovoltaic power capacity credit evaluation model considering the correlation between photovoltaic power generation and system load[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 1-6.
- [21] 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.
- [22] 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.  
DING Lei, PAN Zhencun, CONG Wei. Searching for intentional islanding strategies of distributed generation based on rooted tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 62-67.
- [23] 陈汝斯, 林涛, 余光正, 等. 计及电能质量影响的智能配电网孤岛划分策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 2): 150-158.  
CHEN Rusi, LIN Tao, YU Guangzheng, et al. Island separation strategy of smart distribution grid considering the effects of power quality factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S2): 150-158.
- [24] 王增平, 张丽, 徐玉琴, 等. 含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 8-14.  
WANG Zengping, ZHANG Li, XU Yuqin, et al. Service restoration strategy for blackout of distribution system with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 8-14.

收稿日期: 2016-08-14; 修回日期: 2016-10-17

作者简介:

齐 郑(1977—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: qizheng319@126.com

张首魁(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障恢复。E-mail: shoukuizhang611@163.com

(编辑 葛艳娜)