

# 大停电后含分布式电源的电网分区及负荷恢复方案

刘 仲, 牟龙华, 杨智豪

(同济大学电气工程系, 上海 201804)

**摘要:** 含有分布式电源(Distributed Generation, DG)的电网在发生大停电事故后, 为提高系统恢复效率, 一般将电网进行合理分区, 并采用分区并行恢复的方案。首先运用灰色决策理论选取了各分区的黑启动电源, 结合最短路径快速算法(Shortest Path Faster Algorithm, SPFA)搜索各黑启动电源到待恢复节点的最优恢复路径; 然后据此建立了兼顾恢复时间性和安全性的最优分区多目标优化模型, 并采用多目标粒子群优化算法(Multi-objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)对模型进行了求解。基于所得的最优分区方案, 以构建初步网架为目标, 结合遗传算法对各分区内的负荷恢复问题进行了优化。IEEE 30 节点算例验证了所提方案的有效性。

**关键词:** 黑启动; 分布式电源; 系统分区; 多目标粒子群算法; 负荷恢复

## Scheme for partitioning and load restoration of power grid containing distributed generation after blackout

LIU Zhong, MU Longhua, YANG Zhihao

(Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** After blackout, in order to improve the efficiency of system restoration for power grid containing distributed generation (DG), this paper partitions the grid into several subsystems and restores them in parallel. Firstly, black-start sources for each subsystem are selected by employing grey decision theory, and optimal restoration paths from black-start sources to candidate nodes are obtained by utilizing shortest path faster algorithm (SPFA). Secondly, multi-objective optimization model for optimal partitioning, which considers rapidity and security of restoration, is established. Then, the model is solved by multi-objective particle swarm optimization (MOPSO). Afterwards, for the purpose of reconfiguring primary skeleton network, load restoration inside each subsystem is optimized by adopting genetic algorithm (GA) based on the optimal partitioning scheme acquired previously. The effectiveness of the proposed scheme is validated by the simulation results of IEEE 30-bus system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407128).

**Key words:** black start; distributed generation; system partitioning; multi-objective particle swarm optimization; load restoration

中图分类号: TM715

文章编号: 1674-3415(2015)22-0055-07

## 0 引言

分布式电源(Distributed Generation, DG)可以根据系统需要在联网和孤岛两种运行模式之间灵活地切换, 在提高能源综合利用效率的同时, 保证了系统的供电可靠性。然而, 随着大量 DG 的接入以及用电负荷的增加, 电网结构日趋复杂, 当其内部或

外部发生严重故障时, 电网就有可能出现大面积的停电事故。为实现故障系统的快速稳定恢复, 含 DG 电网的黑启动研究显得尤为重要。为了加快黑启动进程, 减少大停电带来的损失, 一般采用并行恢复的方式, 即将电网划分为若干个分区, 并在每个分区内部独立实现系统恢复, 最后通过统一并网以完成整个电网的恢复<sup>[1-2]</sup>。

在传统的黑启动方案中, 一般采用分区并行恢复的方式。文献[3]在系统分区时考虑了机组容量和启动时间限制, 且实现了机组启动顺序的最优化,

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51407128); 浙江省科技计划项目(2013C01063)

但未构建初步网架。文献[4]提出了基于多层图分割理论的分区策略,但采用的贪婪算法全局搜索能力较差,且未考虑分区内的恢复问题。文献[5]采用禁忌搜索算法对系统进行了合理分区,但该算法对初始解的依赖性过强。文献[6]提出了以节点电压相近度为判据的分区方法,但未考虑节点恢复路径以及恢复顺序的影响因素。

在负荷恢复方面,文献[7]提出了基于电网分区的负荷恢复策略,其在分区优化中通过简单的加权求和来实现多目标优化,使得最优解对目标权值的设定过分依赖。文献[8]实现了网架重构阶段的多时步负荷恢复优化,负荷和线路的投入时间和顺序则由调度员主观决定。

综上所述,含 DG 电网的黑启动研究中,关于系统分区以及分区内的负荷恢复问题尚少有研究。本文从系统分区原则以及 DG 运行特性出发,首先搜索了各待恢复节点的最优恢复路径;进而以各分区恢复时间差最小和恢复代价最小为目标,建立了最优分区的多目标优化模型并求解;最后基于最优分区方案,采用遗传算法完成了分区内的负荷恢复优化,形成了系统恢复的初步网架。

## 1 系统分区策略

### 1.1 系统分区原则

结合传统电网的系统分区原则,考虑接入 DG 的相关特性,含 DG 的电网在分区时应遵循的原则如下<sup>[9]</sup>。

#### (1) 包含黑启动电源

每个分区内需要包含至少一个具有黑启动能力的 DG,以带动分区内其它 DG 以及待恢复节点,保障分区恢复的成功率。

#### (2) 分区规模及恢复时间相当

此原则可提高系统并行恢复的同步性,减少分区恢复的等待时间,加快黑启动进程。

#### (3) 内部网络紧凑,分区间电气联系少

此原则可减少因线路或节点意外故障而使黑启动进程中止的情况,增加网架重构的成功率,提高系统恢复的可靠性。

#### (4) 分区内出力与负荷平衡

分区内需要包含至少一个 DG 和一个负荷,且需保持 DG 与负荷的功率平衡,以保证系统频率和节点电压的稳定性。

### 1.2 DG 黑启动能力评估

本文从 DG 的各项特性分析出发,应用灰色多属性决策方法<sup>[10]</sup>,对不同类型的 DG 进行黑启动能力评估,选取决策评分高的 DG 作为黑启动电源。

本文选取对黑启动进程影响较大的 DG 特性来构成决策的属性集,包括 DG 容量、升负荷速度、启动时间以及调压调频能力。黑启动能力的评估过程如下。

灰色多属性决策中,属性集记作  $E=\{e_i \mid i=1,2,\dots,n\}$ ;方案集记作  $C=\{c_j \mid j=1,2,\dots,m\}$ ;任一方案  $c_j$  在任一属性  $e_i$  下的评估结果  $r_{ij}$  称为局势,据此可建立局势矩阵  $R=[r_{ij}]_{n \times m}$ 。评估过程分为三个步骤。

#### (1) 效果测度

在任一属性  $e_i$  下的方案评估结果序列  $\{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}\}$  中,各元素与虚拟标准列的相关关系以效果测度  $\eta_{ij}$  表示。 $\eta_{ij}$  的求取依属性的类型而定。

对于效益型属性,其值越大越好,因此

$$\eta_{ij} = \frac{r_{ij}}{\max_j r_{ij}} \quad (1)$$

对于成本型属性,其值越小越好,因此

$$\eta_{ij} = \frac{\min_j r_{ij}}{r_{ij}} \quad (2)$$

对于适中型属性,其值越接近特定评估结果期望值越好,因此

$$\eta_{ij} = \frac{\min\{r_{ij}, \eta'_i\}}{\max\{r_{ij}, \eta'_i\}} \quad (3)$$

式中,  $j=1,2,\dots,m$ ;  $\eta'_i$  为属性  $e_i$  下的特定评估结果期望。

#### (2) 构建决策矩阵

以效果测度  $\eta_{ij}$  为基础,为包含  $n$  个属性、 $m$  个备选方案的决策组合建立决策矩阵  $H$ :

$$H = [\eta_{ij}]_{n \times m} \quad (4)$$

#### (3) 决策评分

对于方案  $c_j$ ,根据决策者的要求,在确定了各属性的权重  $\omega_{Hi}$  后,结合决策矩阵可得方案的决策评分。

$$G_j = \sum_{i=1}^n \omega_{Hi} \eta_{ij} \quad (5)$$

其中,  $\sum_{i=1}^n \omega_{Hi} = 1$ ,  $\omega_{Hi} \in [0,1]$ 。

### 1.3 最优恢复路径搜索

为确定各分区中待恢复节点的最优恢复路径,以分区中的黑启动电源为顶点,依次搜索每个节点的最短恢复路径,步骤如下。

(1) 根据含 DG 电网的结构特点,将其简化为边有权值的连通图。

(2) 对连通图中的每条边赋权。为得到恢复时间最小的路径时, 边权可采用恢复时间代价; 而为兼顾系统恢复的时间性和安全性时, 边权则应综合考虑线路充电无功、线路开关的操作次数以及线路经过的电站个数三个因素, 然后通过多指标量化评估方法来确定边权值。

(3) 采用最短路径快速算法(Shortest Path Faster Algorithm, SPFA)搜索黑启动电源到各节点的最优恢复路径。

SPFA 算法<sup>[11]</sup>是单源最短路径的最好算法之一, 其采用动态优化逼近的方法, 用一个先进先出的队列来作为待优化点的存储池, 初始时将源加入队列, 每次从队列中取队头元素, 并对所有与其相邻的节点进行最短路径值的调整, 如果最短路径值有所变化, 则将这点放回队列继续进行优化, 如此反复, 直到队空。SPFA 算法的时间复杂度为  $O(e)$  ( $e$  为图中边的数量), 优于经典的狄克斯特拉(Dijkstra)算法, 具有搜索效率高、实现简洁等优点。

## 2 最优分区求解

### 2.1 最优分区的目标函数

首先, 考虑分区规模及恢复时间相当的原则, 将各分区的恢复时间差最小作为优化模型的第一个目标函数。其次, 在第二个目标函数中, 综合考虑系统分区的安全性和快速性要求, 一方面将黑启动电源到恢复节点的线路充电无功最小化, 以防止送电时线路的过电压问题; 另一方面将恢复线路中的开关操作次数和经过的电站数最小化, 以加快节点的恢复速度。

以上所讨论的节点恢复路径皆为采用 1.3 节所述的方法搜索所得。

综上所述, 建立如下多目标函数。

$$\begin{cases} \min f_1 = \sum_{i=1}^{n_D} (t_i - \bar{t})^2 \\ \min f_2 = \sum_{i=1}^{n_j} (\omega_1 g_{i,1} + \omega_2 g_{i,2} + \omega_3 g_{i,3}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: 在第一个目标函数中,  $n_D$  为系统分区总数;  $t_i$  为分区  $i$  的恢复时间代价;  $\bar{t}$  为各分区恢复时间代价的平均值,  $\bar{t} = (\sum_{i=1}^{n_D} t_i) / n_D$ 。关于恢复时间代价  $t_i$

的求取, 采用文献<sup>[12]</sup>所述的恢复时间代价对网络线路赋权, 并根据 1.3 节的方法搜索最优恢复路径, 最后对各分区中最优路径的线路权值求和即可得  $t_i$ 。

在第二个目标函数中,  $n_j$  为系统的恢复路径总

数;  $g_{i,1}$ 、 $g_{i,2}$ 、 $g_{i,3}$  分别为恢复路径  $i$  的充电无功值、开关操作次数、经过的电站个数, 且此三项皆为归一化后的值;  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  分别为  $g_{i,1}$ 、 $g_{i,2}$ 、 $g_{i,3}$  的权重, 可根据具体要求进行调整, 且  $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$ ,  $\omega_i \in (0,1)$  ( $i=1,2,3$ )。

### 2.2 最优分区的约束条件

#### (1) 黑启动电源约束

遵照 1.1 节中所述的系统分区原则, 每个分区中必须至少包含一个黑启动电源, 黑启动电源的选取采用 1.2 节所述的方法。

#### (2) 功率平衡约束

针对第  $j$  个分区 ( $j=1, 2, \dots, n_D$ ), 功率平衡约束为

$$\sum_{i=1}^{n_{G,j}} a_{Gi,j} P_{Gi,j} - \sum_{i=1}^{n_{F,j}} a_{Li,j} P_{Li,j} > 0 \quad (7)$$

式中:  $n_{G,j}$  为分区  $j$  中的 DG 个数;  $a_{Gi,j}$  表示分区  $j$  中第  $i$  个 DG 的状态,  $a_{Gi,j}=1$  表示 DG 启动并出力,  $a_{Gi,j}=0$  表示 DG 未启动;  $P_{Gi,j}$  为分区  $j$  中第  $i$  个 DG 的有功出力;  $n_{F,j}$  表示分区  $j$  中的负荷节点个数;  $a_{Li,j}$  表示分区  $j$  中负荷  $i$  的投入状态,  $a_{Li,j}=1$  表示负荷投入,  $a_{Li,j}=0$  表示负荷未投入;  $P_{Li,j}$  为分区  $j$  中负荷  $i$  的有功功率。

#### (3) 网络约束

针对第  $j$  个分区 ( $j=1, 2, \dots, n_D$ ), 网络约束为

$$\begin{cases} P_{Gi,j}^{\min} \leq P_{Gi,j} \leq P_{Gi,j}^{\max}, & i=1, 2, \dots, n_{G,j} \\ Q_{Gi,j}^{\min} \leq Q_{Gi,j} \leq Q_{Gi,j}^{\max}, & i=1, 2, \dots, n_{G,j} \\ U_{i,j}^{\min} \leq U_{i,j} \leq U_{i,j}^{\max}, & i=1, 2, \dots, n_{p,j} \\ P_{Xi,j} \leq P_{Xi,j}^{\max}, & i=1, 2, \dots, n_{L,j} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_{Gi,j}^{\min}$ 、 $P_{Gi,j}^{\max}$  分别为分区  $j$  中第  $i$  个 DG 有功出力的下限和上限;  $Q_{Gi,j}^{\min}$ 、 $Q_{Gi,j}^{\max}$  分别为分区  $j$  中第  $i$  个 DG 无功出力的下限和上限;  $U_{i,j}^{\min}$ 、 $U_{i,j}^{\max}$  分别为分区  $j$  中节点  $i$  上电压值的下限和上限;  $n_{p,j}$  为分区  $j$  的节点总数;  $P_{Xi,j}$  为分区  $j$  中线路  $i$  流过的有功功率;  $P_{Xi,j}^{\max}$  为分区  $j$  中线路  $i$  上所允许的最大有功功率;  $n_{L,j}$  为分区  $j$  的线路总数。

### 2.3 最优分区求解的算法设计

#### 2.3.1 编码方式

为满足计算速度与精度的要求, 采用基于外部档的多目标粒子群优化算法(Multi-objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)<sup>[13]</sup>。另外, 为便于计算, 设计了新的粒子编码方式。

构建  $n_Z \times n_D$  维粒子  $[l_{ij}]$  为

$$I = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n_D} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n_D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n_Z 1} & l_{n_Z 2} & \cdots & l_{n_Z n_D} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $n_Z$ 为系统中所有节点的个数； $l_{ij}$ 取0或1， $l_{ij}$ 取1时表示节点*i*被分配到分区*j*中，取0则表示节点*i*未被分配到分区*j*中。另外，为保证每个分区内包含至少一个黑启动电源，规定粒子矩阵的列数 $n_D$ 应满足 $n_D \in [1, n_H]$ ， $n_H$ 为系统中黑启动电源的个数。

### 2.3.2 算法步骤

#### (1) 初始化种群

按 2.3.1 节设计的编码方式随机生成初始种群，每个粒子代表一组分区方案，并按式(6)计算适应值。

#### (2) 构建外部档

基于 Pareto 支配关系，并结合各粒子的适应值，将非劣粒子加入外部档中。

#### (3) 更新速度与位置

粒子位置的更新采用二进制更新公式，而在速度更新中，所需的个体最优位置取自粒子历史非劣个体位置，全局最优位置则需结合自适应网格法<sup>[14]</sup>和轮盘赌法选取外部档中分布稀疏区域的粒子位置。

#### (4) 迭代终止条件

迭代次数达到预设的最大迭代次数时，终止计算，输出结果，否则返回步骤(3)重新计算，直至满足迭代终止条件。

## 2.4 系统分区的最优解选取

由于采用多目标粒子群算法会得到多个互不支配的分区方案，因此需根据系统恢复的具体要求以及调度人员的决策建议，从中选取一个最优分区方案。选取过程可视为多属性决策过程，以互不支配的分区方案作为备选方案，以优化模型中的两个目标函数值作为属性，采用 1.2 节所述的灰色多属性决策方法进行决策分析，评分最高的方案即为最优分区方案。

## 3 分区内的负荷恢复优化

### 3.1 负荷恢复的优化模型

在确定最优分区后，接下来需要完成系统网架的初步构建，即在黑启动 DG 及其他 DG 实现部分出力恢复的基础上实现系统中重要负荷节点的供电恢复，以形成系统恢复的骨架，为后续负荷的全面恢复奠定基础。

#### 3.1.1 目标函数

对每一个分区分别建立如下目标函数

$$\max F = \sum_{i=1}^{n_{F,j}} a_{Li,j} \omega_{Li,j} P_{Li,j} \quad (10)$$

式中： $n_{F,j}$ 、 $a_{Li,j}$ 、 $P_{Li,j}$ 表示的含义与 2.2 节的相同； $\omega_{Li,j}$ 为分区*j*中负荷*i*的负荷权重，根据负荷等级及其重要程度取值。

#### 3.1.2 约束条件

为保障负荷恢复过程中的频率安全，并防止过电压以及潮流越限情况的发生，应考虑约束条件如下。

##### (1) 单次投入负荷量约束

单次投入的负荷量过大，会使频率下降值超过最大限值，进而引起低频减载动作而破坏系统稳定，参照文献[14]，每次投入的最大负荷量应取为

$$P_T = \Delta f_{\max} \sum_{i=1}^{n_{S,j}} \frac{P_{Ni}}{df_i} \quad (11)$$

式中： $\Delta f$ 为系统允许的最大频率下降值； $n_{S,j}$ 为分区*j*中已并网出力的 DG 个数； $P_{Ni,j}$ 为分区*j*中第*i*个 DG 的额定有功出力； $df_{i,j}$ 为分区*j*中第*i*个 DG 在系统当前负荷率下的频率响应值。

##### (2) 功率平衡约束

功率平衡约束的表达式为

$$\sum_{i=1}^{n_{G,j}} a_{Gi,j} P_{Gi,j} - \sum_{i=1}^{n_{F,j}} a_{Li,j} P_{Li,j} > 0 \quad (12)$$

##### (3) 网络约束

包括 DG 有功、无功出力约束、节点电压约束、线路潮流约束等。

## 3.2 负荷恢复优化模型的求解

### 3.2.1 约束条件的处理

对于约束条件(1)，根据  $P_T$  值对待恢复的负荷节点进行预选，排除负荷量超过  $P_T$  的节点。而对于约束条件(2)，以罚函数的形式加入至目标函数中，形成适应度函数。适应度函数表达式为

$$\min F_S = -\left(\sum_{i=1}^{n_{F,j}} a_{Li,j} \omega_{Li,j} P_{Li,j} - \varepsilon \Psi_j\right) \quad (13)$$

式中： $\varepsilon$ 为惩罚因子； $\Psi_j$ 为分区*j*的功率越限值式(14)。

$$\Psi_j = \begin{cases} 0 & \left(\sum_{i=1}^{n_{G,j}} a_{Gi,j} P_{Gi,j} \geq \sum_{i=1}^{n_{F,j}} a_{Li,j} P_{Li,j}\right) \\ \sum_{i=1}^{n_{F,j}} a_{Li,j} P_{Li,j} - \sum_{i=1}^{n_{G,j}} a_{Gi,j} P_{Gi,j} & \left(\sum_{i=1}^{n_{G,j}} a_{Gi,j} P_{Gi,j} < \sum_{i=1}^{n_{F,j}} a_{Li,j} P_{Li,j}\right) \end{cases} \quad (14)$$

### 3.2.2 遗传算法求解步骤

遗传算法自适应能力强, 且具有较强的全局搜索能力, 故采用此方法对负荷恢复的优化模型进行求解<sup>[15]</sup>, 步骤如下。

#### (1) 初始化

设置种群规模、交叉概率、变异概率以及最大迭代次数。采用设计的基因编码方式随机生成初始种群。设计染色体长度为分区内待恢复的节点数目, 基因为 1 时表示节点选中, 为 0 时表示未选中。

#### (2) 个体评价

设置合理的惩罚因子, 并根据式(13)计算各个体的适应度值。

#### (3) 种群进化

根据个体的适应度运用选择算子选择相对较优的母体, 并按照设定的交叉概率和变异概率对母体进行交叉、变异操作, 最后得到新一代种群。

#### (4) 进化终止

检验是否达到最大迭代次数, 达到则输出最优解, 否则返回步骤(3)继续迭代, 直至满足终止条件。

## 4 算例分析

采用 Matlab 软件编程, 对改进后的 IEEE 30

表 1 DG 特性及决策评分

Table 1 DGs' characteristics and decision-making score

节点编号	类型	容量/kW	升负荷速度/(kW/min)	启动时间/min	调压调频能力	黑启动能力决策评分
1	风机(带储能)	650	35	4.5	75	0.7089
2	微型燃气轮机	950	50	5.3	93	0.9004
8	光伏(不带储能)	400	22	2.9	48	0.5762
13	光伏(带储能)	700	32	4.3	68	0.6966
22	风机(不带储能)	450	25	3.3	54	0.5953
23	微型燃气轮机	850	40	4.4	87	0.8280
27	蓄电池	750	38	3.9	80	0.7887

接下来进行最优分区的优化计算, 在 MOPSO 算法中, 设定种群规模 100, 最大迭代次数 100, 惯性权重 0.9 至 0.4 线性减小, 学习因子皆取 2, 粒子在初始化为  $n_z \times n_D$  维矩阵时, 取  $n_z=30$ ,  $n_D$  随机指定为 [1,3] 区间的整数。经计算可得 3 组互不支配的分区方案, 各方案对应的目标函数值如表 2 所示, 各方案的分区示意图如图 2、图 3、图 4 所示。在最优分区的决策过程中, 将  $\min f_1$  和  $\min f_2$  视为两个属性, 属性权重分别指定为: 0.55、0.45, 最终得到各方案的决策评分如表 2 所示。据此选择分数最高的方案 2 作为最优系统分区方案。可以看出, 方案 2 中的每个分区都含有一个黑启动电源, 分区内网络

节点系统分别进行分区优化和负荷恢复优化, 分析所得的优化结果, 验证所提方案的有效性。

### 4.1 系统分区优化

IEEE 30 节点系统结构如图 1 所示, 包括 7 个 DG, 30 个负荷节点以及 41 条线路。各 DG 的特性参数如表 1 所示, 根据 1.2 节所述方法对 DG 进行黑启动能力评估, 得到各 DG 的决策评分如表 1 所示。选取分数最高的 3 个 DG 作为黑启动电源, 即 DG2、DG23、DG27。

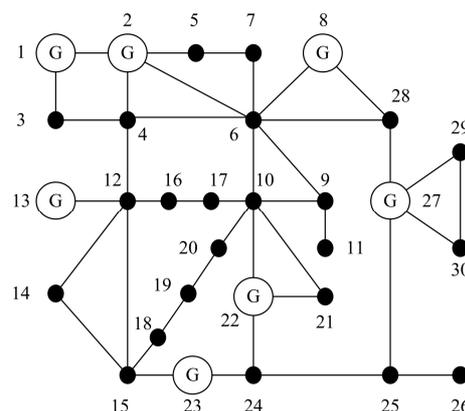


图 1 IEEE 30 节点系统结构

Fig. 1 Structure of IEEE 30-bus system

紧凑, 各分区系统规模相当且恢复时间相差最小, 符合 1.1 节中所述的各项分区原则。

表 2 待选分区方案

Table 2 Candidate partition schemes

方案编号	$\min f_1$	$\min f_2$	决策评分
1	3.2600	13.5	0.4579
2	0.0467	15.9	0.9321
3	1.4067	15.0	0.4233

### 4.2 负荷恢复优化

针对图 3 所示的最优分区方案, 对其 3 个分区分别进行负荷恢复优化, DG2、DG23、DG27 分别作为各自分区的黑启动电源, 系统中的一级负

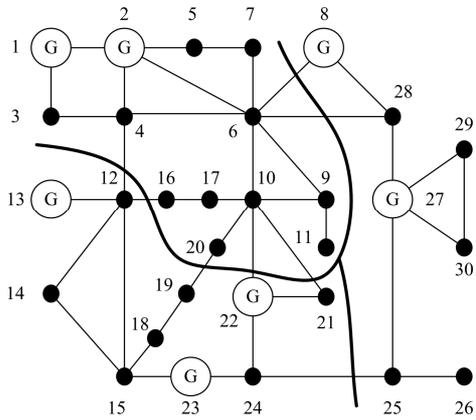


图2 分区方案1

Fig. 2 Partition scheme No.1

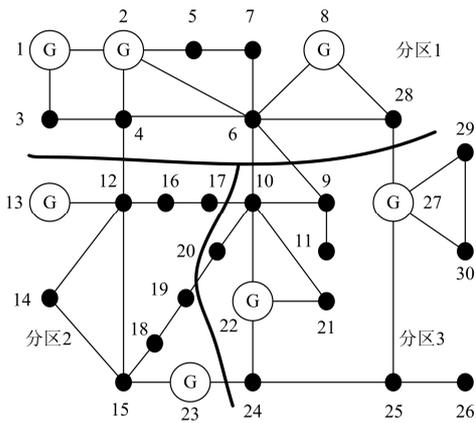


图3 分区方案2

Fig. 3 Partition scheme No.2

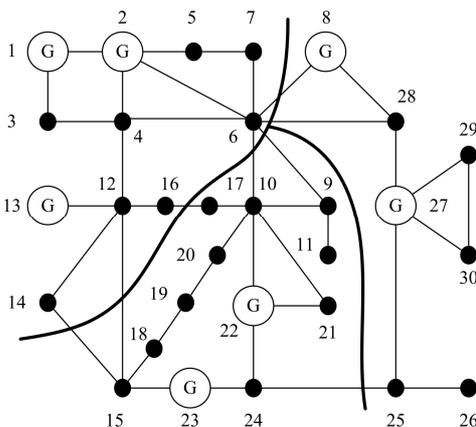


图4 分区方案3

Fig. 4 Partition scheme No.3

荷节点包括: 1、2、3、4、6、12、13、15、18、23、24、25、27。在分区1中, 设定 DG2 恢复 35%出力, DG1 恢复 30%出力。在采用遗传算法进行优化

计算时, 参数设定如下: 种群规模 50, 选择方法采用轮盘赌法, 交叉概率 0.6, 变异概率 0.01。另外, 一、二、三级负荷权重分别设置为 1、0.1、0.03。计算得到分区 1 中可恢复的负荷节点为 1、2、3、4、6, 投入的线路为: 1-2、1-3、2-4、2-6, 恢复的负荷量为 513 kW, DG 有功出力之和为 527.5 kW。对分区 2 和分区 3 采用相同的方法进行负荷恢复优化, 所得优化结果如表 3 所示。从中可以看出, 各分区内的重要负荷节点得到了恢复, 完成了构建初步网架的目标, 恢复的负荷量与 DG 有功出力之和相差较小, 说明 DG 恢复的出力得到了充分利用。在最后的潮流检验中, 系统频率与节点电压值都在允许范围内, 说明了所得优化方案的可行性。

表 3 各分区的最优负荷恢复方案

Table 3 Optimal schemes for load restoration of three partitions

分区 编号	恢复的负 荷节点	投入的 线路	负荷量/ kW	DG 出力/ kW
1	1、2、3、4、6	1-2、1-3、2-4、 2-6	513.0	527.5
2	12、13、15、 18、23	13-12、23-15、 15-18	496.0	507.5
3	24、25、27	27-25、25-24	258.0	262.5

## 5 结论

本文针对含 DG 电网在大停电后的黑启动问题, 提出了系统分区以及分区内负荷恢复的优化方案。首先, 在综合考虑系统分区原则和 DG 运行特性的基础上, 提出了最优分区的多目标优化模型, 结合 SPFA 和 MOPSO 算法得到了最优分区方案, 此方案可满足系统分区的时间性和安全性要求; 然后在最优分区的基础上, 以形成初步网架为目标, 采用遗传算法计算得到了各分区内的最优负荷恢复方案, 各分区按此方案实施并行恢复, 满足了黑启动快速性和稳定性的要求。最后的算例分析验证了所提方案的可行性。

## 参考文献

- [1] 牟龙华, 夏明栋, 刘仲. 微电网的黑启动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 32-37.  
MU Longhua, XIA Mingdong, LIU Zhong. Research on black-start for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 32-37.
- [2] 王紫雷. 基于复杂网络理论的受端电网分层分区[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 69-74.  
WANG Zilei. Fast voltage control partitioning using special bisection method based on complex network

- theory[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 69-74.
- [3] LIANG Haiping, GU Xueping, ZHAO Dongwen. Optimization of system partitioning schemes for power system black-start restoration based on genetic algorithms[C] // Power and Energy Engineering Conference in Asia-Pacific (APPEEC), 2010: 1-4.
- [4] TIAN Zhen, MIAO Weiwei, JIA Hongjie, et al. Multilevel partitioning algorithm for power system splitting control[C] // Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2012: 1-6.
- [5] 吴焯, 房鑫炎, 张焰, 等. 基于禁忌搜索算法的黑启动子系统划分[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 6-11.  
WU Ye, FANG Xinyan, ZHANG Yan, et al. Tabu search algorithm based black-start zone partitioning[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 6-11.
- [6] 梁海平, 顾雪平. 基于节点电压相近度的黑启动子系统划分方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 81-86.  
LIANG Haiping, GU Xueping. Black-start subsystem partitioning based on similarity of nodes voltage[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 81-86.
- [7] 石立宝, 赤东阳, 姚良忠, 等. 基于电网分区的负荷恢复智能优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 1-7.  
SHI Libao, CHI Dongyang, YAO Liangzhong, et al. Intelligent optimization strategy for load restoration considering power grid partitioning[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 1-7.
- [8] 钟慧荣, 顾雪平, 朱玲欣. 黑启动恢复中网架重构阶段的负荷恢复优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 26-32.  
ZHONG Huirong, GU Xueping, ZHU Lingxin. Optimization of load restoration during network reconfiguring process of black-start restoration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 26-32.
- [9] 梁海平, 芦佳硕, 顾雪平. 基于恢复路径转移系数的电网黑启动分区策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 1-7.  
LIANG Haiping, LU Jiashuo, GU Xueping. Black-start network partitioning based on the restoration path altering coefficient[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(2): 1-7.
- [10] 简祯富. 决策分析与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [11] 段凡丁. 关于最短路径的 SPFA 快速算法[J]. 西南交通大学学报, 1994, 29(2): 207-212.  
DUAN Fanding. A faster algorithm for shortest-path — SPFA[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1994, 29(2): 207-212.
- [12] 曾顺奇, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及操作时间不确定性的电力系统网架重构策略优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 35(23): 16-21.  
ZENG Shunqi, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimization of network reconfiguration strategy for power systems considering operating time uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 35(23): 16-21.
- [13] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [14] ADIBI M M, BORKOSKI J N, KAFKA R J, et al. Frequency response of prime movers during restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 751-756.
- [15] 况达, 滕欢, 王博堃, 等. 基于改进遗传算法的蓄电池容量配置及充放电策略研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 90-96.  
KUANG Da, TENG Huan, WANG Bokun, et al. Capacity allocation and charging-discharging strategies study of storage battery based on improved genetic algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 90-96.

收稿日期: 2015-04-19

作者简介:

刘 仲(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网黑启动、微电网保护; E-mail: zeakyleo@163.com

牟龙华(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网、电能质量; E-mail: lhmu@tongji.edu.cn

杨智豪(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网的控制与保护。

(编辑 张爱琴)