

DOI: 10.7667/PSPC161447

## 考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复优化

李凯<sup>1</sup>, 李少岩<sup>1</sup>, 顾雪平<sup>1</sup>, 岳贤龙<sup>2</sup>, 王佳裕<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000; 2. 国网冀北电力有限公司物资分公司, 北京 100075)

**摘要:** 对大停电后机组和负荷的协调恢复的方案优化方法进行了研究。针对已有机组恢复的研究往往忽略了同一电厂不同机组对电网恢复过程贡献不同的不足,建立了考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复方案优化数学模型。将待恢复机组分为网络重构层机组和厂站恢复层机组两个层次,通过分析两层机组恢复及负荷恢复的交互影响,提出了机组恢复的多目标分层协调优化策略。将机组恢复的连续过程划分为多个次序进行的恢复时段,结合快速非支配排序遗传算法、CRITIC 客观赋权法和灰色关联投影法对每一时步机组恢复方案进行优化决策。进一步地,结合模糊层次分析法和贪心算法为各时步确定重要负荷恢复方案。新英格兰 10 机 39 节点系统算例验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 恢复控制; 机组分层恢复; 重要负荷恢复; 多目标优化; 贪心算法

### Coordinated two-layer unit restarting considering important load recovery after blackout

LI Kai<sup>1</sup>, LI Shaoyan<sup>1</sup>, GU Xueping<sup>1</sup>, YUE Xianlong<sup>2</sup>, WANG Jiayu<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Co. Ltd Material Branch, Beijing 100075, China)

**Abstract:** The optimization of coordinated recovery of units and important loads after blackout is studied. Since the contribution to the power system recovery process of different units in the same plant is neglected in former studies, a coordinated two-layer unit restarting considering important load recovery optimization model is established in this paper. The units to be recovered are divided into network-layer units and plant-layer units. By studying the interaction of two-layer units and important loads, the coordinated multi-objective hierarchical restoration method for units is proposed. The continuous unit restoration process is divided into sequential time steps. For each time step, the non-dominated sorting genetic algorithm and the combined use of CRITIC objective weighting method and grey relation projection method are employed to solve the unit restoration optimization problem. Furthermore, the fuzzy analytical hierarchy process and the greedy algorithm are employed to determine the restoration scheme of important loads for each time step. The effectiveness of the proposed method is validated by the optimization results on the New England 10-unit 39-bus power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277076) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014XS75).

**Key words:** restoration control; two-layer unit restarting; important load recovery; multi-objective optimization; greedy algorithm

## 0 引言

为了提高运行性能和经济效益,现代电网互联规模不断扩大,大电网中的各个子系统之间的相互联系也更加紧密,系统运行状态更加复杂<sup>[1]</sup>。同时,

随着新能源的加速发展,电网安全运行面临着全新的不确定因素。在这种背景下,可能由于自然或人为原因出现局部故障,若处理不当便会出现区域停电事故甚至引发大面积的停电事故<sup>[2-3]</sup>。大停电事故发生后,安全合理地恢复操作可以保证恢复过程快速有序地进行,否则会导致恢复操作失败、延缓恢复进程,加剧经济损失和不良的社会影响。因此制定科学合理的黑启动方案具有重要意义<sup>[4]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51277076); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014XS75)

大停电后的恢复过程中, 机组的启动为后续恢复过程提供了功率支撑, 整个恢复过程是否能够成功都依赖于机组的恢复效果<sup>[5]</sup>。文献[6]将机组的启动序列优化问题转化为求解一个混合整数线性规划问题, 为所有的黑启动和非黑启动机组提供了启动顺序。文献[7-8]采用最短路径算法确定机组的恢复路径, 以恢复路径的投运风险和操作代价等指标最小为机组恢复目标, 优化确定机组的恢复顺序。文献[9-10]对线路恢复操作的可靠性和线路的重要性进行了研究并提出了相关指标, 综合考虑机组恢复效益指标对机组恢复顺序进行优化决策, 得到的方案中同时给出了机组的恢复顺序和机组恢复路径。

以上关于机组恢复优化的研究, 或是将一个电厂按一台机组处理, 或者每个电厂仅考虑一台机组的恢复(即仅考虑了系统内部分机组的恢复), 与实际恢复过程偏差较大, 降低了其在实际系统恢复决策支持中的应用价值。文献[11]同时考虑了网络层机组、厂站层机组以及重要负荷的恢复, 但是将这3个问题分别建模为单独的优化问题, 然后用字典排序优化算法来解决3个模型之间的配合优化问题。但该研究中网络层机组的恢复优先级远高于任一厂站层机组, 不利于发挥厂站层机组恢复的价值, 其实质是一种先决策后优化的多目标优化策略, 无法为调度运行人员提供丰富、可行的恢复方案。

针对以上研究的不足, 本文建立了考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复优化的网架重构方案优化模型。将连续的网架重构过程划分为若干次序进行的多时步恢复过程。针对网络层机组和厂站层机组恢复代价及其对后续恢复过程贡献的不同, 制定了机组恢复的一组优化目标。采用快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解该多目标优化模型, 对于求解得到的机组恢复方案 Pareto 最优解集, 结合 CRITIC 客观赋权法和灰色关联投影法进行多属性决策得到单一时步机组分层恢复组合。进一步地, 建立了与机组分层恢复配合的重要负荷恢复方案优化模型, 通过模糊层次分析法确定重要负荷的权重, 采用贪心算法优化确定该时步重要负荷恢复方案。新英格兰 10 机 39 节点算例验证了本文所提模型和算法的有效性。

## 1 考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复模型

将大停电后的连续恢复过程划分为次序进行的多时步过程, 每一时步的时长为  $\Delta t$ 。整体优化过程如图 1 所示。对于每一时步的优化, 首先根据已经

恢复机组的出力曲线确定本时步可用的启动功率, 并计及运行约束和操作约束等, 求解机组分层恢复多目标优化模型, 确定该时步最优机组恢复方案。当该时步机组启动后仍有剩余可用启动功率, 则按照计算的负荷重要性的不同, 采用贪心算法确定该时步负荷恢复方案。重复上述过程, 直到所有待恢复机组完成启动。由于恢复过程被划分为多个时步, 不失一般性, 以下针对第  $k$  时步机组和负荷的协调恢复过程进行建模分析。

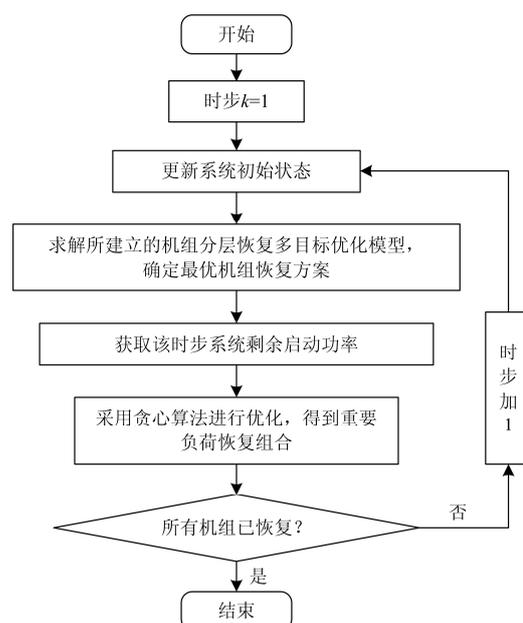


图 1 考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复优化流程图  
Fig. 1 Optimization flowchart of coordinated two-layer unit restarting considering important load recovery

### 1.1 机组恢复目标函数

#### 1) 恢复机组额定功率总和

$$f_1 = \sum_{i=1}^{n_G} c_i^1 P_{M,i} \quad (1)$$

式中:  $n_G$  为待恢复的机组数, 包括网络层机组和厂站层机组;  $c_i^1$  表示机组  $i$  是否在该时步启动, 是则取 1, 否则为 0;  $P_{M,i}$  为机组  $i$  的额定功率。

#### 2) 恢复路径途经节点重要度

$$f_2 = \sum_{s=1}^{n_N} c_s^2 \alpha_s \quad (2)$$

式中:  $n_N$  为待恢复的网络层节点总数, 包括网络层机组节点和变电站节点;  $c_s^2$  表示是否为送电路径途经节点, 是则为 1, 否则取 0, 其中送电路径采用 Dijkstra 算法进行求取;  $\alpha_s$  为网络层节点  $s$  的重要度。本文采取节点收缩后的网络凝聚度<sup>[12]</sup>来定量表

示网络层节点的相对重要度，将待评价节点以及与其相连的节点相短接，凝聚为一个节点后，定义待评价节点的重要度  $\alpha$  为

$$\begin{cases} \alpha = 1/nl \\ l = \sum_{p,q \in V} D_{\min,pq} / (n(n-1)/2) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $n$  为节点收缩后网络中的节点数目； $l$  为节点收缩后节点之间的平均最短路径； $D_{\min,pq}$  是用边的数目表示的节点收缩后网络中任意两个节点  $p$  和  $q$  之间的最短路径； $V$  是节点收缩后网络中所有节点组成的集合。

3) 机组等效爬坡率之和

$$f_3 = \sum_{i=1}^{n_G} c_i^1 K'_{p,i} \quad (4)$$

式中， $K'_{p,i}$  为机组  $i$  的等效爬坡率。机组等效爬坡率是基于图 2 所示的发电机简化出力曲线<sup>[13]</sup>提出的。

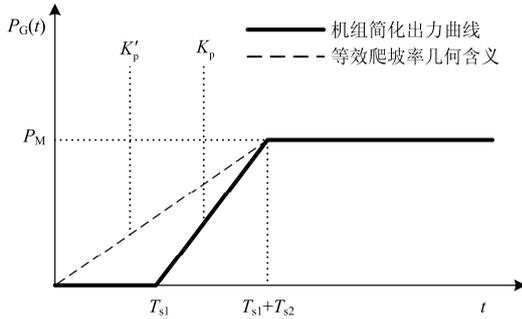


图 2 机组简化出力曲线

Fig. 2 Simplified unit power output curve

如图 2 所示，机组爬坡率  $K_p$  的定义为

$$K_p = P_M / T_{s2} \quad (5)$$

式中： $T_{s1}$  为机组从带电到开始发电的时间； $T_{s2}$  为机组从开始发电到达到额定功率的时间。机组爬坡率表征了机组从开始发电到达到额定功率的速度。在本问题的背景下，希望得到机组从获得启动电源到满载的速度，以衡量机组启动对恢复过程贡献的大小。因此提出了机组的等效爬坡率指标，定义为

$$K'_p = P_M / (T_{s1} + T_{s2}) \quad (6)$$

最终，机组恢复优化总的目标函数为

$$\max F_G = [f_1, f_2, f_3]^T \quad (7)$$

### 1.2 负荷恢复目标函数

网架重构阶段负荷恢复的主要目标是充分利用已经并网机组提供的发电功率，在保证系统稳定运行的前提下恢复尽可能多的重要负荷，因此定义负荷恢复的优化目标为

$$\max F_L = \sum_{j=1}^{n_L} c_j^3 w_j \beta_j P_{L,j} \quad (8)$$

式中： $n_L$  为待恢复负荷节点的数目； $c_j^3$  表示负荷节点  $j$  上的重要负荷是否在本时步恢复，是则取 1，否则为 0； $w_j$  为负荷节点  $j$  上负荷的重要性权重； $\beta_j$  为负荷节点  $j$  上重要负荷所占的比例； $P_{L,j}$  为负荷节点  $j$  的负荷有功功率。

综合考虑重要负荷的恢复代价、重要性、可靠性以及负荷恢复对后续网架重构的影响，采用模糊层次分析法<sup>[11]</sup>对重要负荷的权重进行计算。负荷重要性的层次结构模型如图 3 所示。

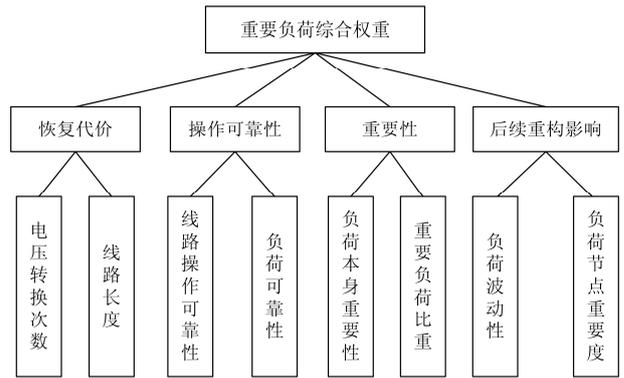


图 3 确定负荷权重的层次结构模型

Fig. 3 Hierarchical model of load weight

### 1.3 模型约束

#### 1) 启动功率约束

对于每个时步，被启动机组辅机启动和重要负荷恢复所需的启动功率之和应小于系统在此时步能提供的启动功率。

$$\sum_{i=1}^{n_G} c_i^1 P_{cr,i} + \sum_{j=1}^{n_L} c_j^3 \beta_j P_{L,j} \leq \sum_{i=1}^{n_G} e_i (P_{G,i}(k\Delta t) - P_{G,i}((k-1)\Delta t)) \quad (9)$$

式中： $P_{cr,i}$  为机组  $i$  辅机启动所需的启动功率；

$\sum_{i=1}^{n_G} e_i (P_{G,i}(k\Delta t) - P_{G,i}((k-1)\Delta t))$  表示已并网机组在第  $k$  时步增发的功率，可按照图 2 所示机组简化出力函数计算求取； $e_i$  表示机组  $i$  是否已经并网发电，是则为 1，否则取 0。

#### 2) 机组启动时间约束

热启动机组具有最大临界热启动时间限制。

$$0 < T_{s,i} < T_{ch,i} \quad (10)$$

式中： $T_{s,i}$  为机组  $i$  的带电时刻； $T_{ch,i}$  为机组  $i$  的最大临界热启动时间。

冷启动机组具有最小临界启动时间限制。

$$T_{s,i} > T_{cc,i} \quad (11)$$

式中,  $T_{cc,i}$  为机组  $i$  的最小临界启动时间。

### 3) 调度操作约束

由于电厂操作人员及设备有限, 一个时步内只能启动同一电厂中的一台机组。

### 4) 单个负荷最大功率约束

$$\begin{cases} P_{GL,max,i} < P_{L,max}(k) \\ \beta_j P_{L,j} < P_{L,max}(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P_{GL,max,i}$  表示机组  $i$  的最大厂用电负荷的有功功率;  $P_{L,max}(k)$  表示第  $k$  时步可恢复的单个负荷的最大功率。根据文献[14], 第  $k$  时步系统中可恢复单个负荷的最大功率计算方法为

$$P_{L,max}(k) = \Delta f_{max} \sum_{i=1}^{n_G} e_i \frac{P_{M,i}}{df_i} \quad (13)$$

式中:  $\Delta f_{max}$  为允许系统频率下降的最大值;  $df_i$  为机组在当前负荷率下的频率响应值。通过对机组在典型负荷率下的频率响应值进行分段线性化, 可以得到机组在不同负荷率下的频率响应值。

### 5) 运行约束

$$\begin{cases} P_{G,i}^{min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{max} \\ Q_{G,i}^{min} \leq Q_{G,i} \leq Q_{G,i}^{max} \\ V_{N,g}^{min} \leq V_{N,g} \leq V_{N,g}^{max} \\ P_{L,h} \leq P_{L,max,h} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{G,i}^{min}$  和  $P_{G,i}^{max}$  分别为机组  $i$  有功出力  $P_{G,i}$  的下限和上限;  $Q_{G,i}^{min}$  和  $Q_{G,i}^{max}$  分别为机组  $i$  无功出力  $Q_{G,i}$  的下限和上限;  $V_{N,g}^{min}$  和  $V_{N,g}^{max}$  分别为节点  $g$  电压幅值  $V_{N,g}$  的下限和上限;  $P_{L,max,h}$  为线路  $h$  上流过有功功率  $P_{L,h}$  的上限。

## 2 模型求解

对于每个时步, 首先根据已经恢复机组的出力曲线确定本时步可用的启动功率, 采用快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解机组分层恢复的多目标优化问题, 得到 Pareto 最优解集, 然后结合 CRITIC(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)客观赋权法与灰色关联投影法确定单时步机组恢复方案。进一步, 若本时步系统中仍有剩余的启动功率, 则按照负荷恢复的目标函数, 采用贪心算法确定本时步重要负荷的恢复方案。

### 2.1 基于 NSGA-II 算法的机组分层恢复优化

协调各个目标函数间的关系, 寻找能使各优化目标值尽量达到最优的 Pareto 最优解集是多目标优

化算法的核心。2000 年印度科学家 Deb 提出了 NSGA-II 算法<sup>[15]</sup>, 该算法通过引入快速非支配排序方法、排挤算法和精英保留策略, 有效降低了算法的复杂度并且能够更好地保持种群多样性。由于机组恢复后效率较强, 且本文建立的机组分层恢复模型为多目标优化模型, 因此引入 NSGA-II 算法对该模型进行求解, 主要环节如下。

#### 1) 编码与种群初始化

本文采用二进制法对基因进行编码。染色体的长度为所有待恢复的网络层机组和厂站层机组的总数。染色体的每一位用 0 或 1 表示, 0 表示该机组在该时步不会启动, 1 表示该机组将在该时步启动。按照设定的编码规则随机生成种群。

#### 2) 非支配排序

非支配排序的作用是引导搜索朝着 Pareto 最优解集的方向进行, 并根据个体的非劣解水平对种群进行分层。

#### 3) 拥挤算法

NSGA-II 通过提出个体拥挤距离的概念, 在具有相同适应值级别的个体内进行选择性排序。个体的拥挤距离定义为目标空间上与之相邻的两个个体之间的距离。

#### 4) 精英策略

精英策略是指将由父代和子代组成的种群按照非支配序从优到劣以及个体拥挤距离从大到小的顺序依次放入新父代中, 到种群数量到达最大值时为止。

#### 5) 染色体修正环节

对不满足约束的染色体处理方法通常有惩罚函数法和修正法, 大量实验表明修正法性能更佳, 本文在经典 NSGA-II 算法基础上, 添加染色体修正环节提高算法搜索效率。种群初始化及其他随机环节之后需要进行以下几方面的修正。

(1) 机组恢复状态约束: 将所有个体中已经启动机组对应的位置置零, 确保已经恢复的机组不会出现在后续时步的恢复方案中。

(2) 启动功率约束: 对染色体中要启动机组所需要的启动功率进行检验, 如果不满足启动功率约束, 则必须进行修正。将要启动机组按额定功率与启动功率的比值大小进行排序, 依次将比值较小的机组对应的染色体位置置零, 直到启动功率满足启动功率约束。

(3) 厂站层机组启动约束。这里考虑到两点实际的约束, 一点是只有网络层机组启动之后, 厂站层机组才能启动, 否则应全部置零; 另一点是由于调度操作的约束, 在某一时步一个厂站内只能启动一台机组, 若初始化后的染色体要启动多个机组, 应

随机选择其中的一台机组进行启动。

(4) 单个负荷最大功率约束: 在每一时步起始时刻计算系统中可恢复单个负荷的最大功率  $P_{L\max}(k)$ , 根据  $P_{L\max}(k)$  将染色体中不符合单个负荷最大功率约束的机组对应的染色体位置置零。

## 2.2 结合 CRITIC 赋权与灰关联投影法的机组恢复方案多属性决策

基于 NSGA-II 算法的机组分层恢复方案多目标优化确定了 Pareto 最优解集后, 需要进一步通过多属性决策确定最终机组恢复方案。本文采用 CRITIC 客观赋权法<sup>[16]</sup>为每一时步的 Pareto 解集计算 3 个目标的权重, 然后引入灰关联投影法<sup>[17]</sup>确定该时步的机组最优恢复方案。

CRITIC 法是一种客观赋权法, 通过对目标间的对比强度和冲突性综合考虑来确定目标的权重。其中对比强度用同一个目标下各个方案之间的标准差  $\sigma$  来表示。冲突性则与目标之间的相关性有关, 若两个目标之间相关性较强, 则它们之间的冲突性较低<sup>[16]</sup>。目标  $j$  的冲突性量化指标为  $\sum_{i=1}^n (1-r_{ij})$ , 其中  $r_{ij}$  为目标  $i$  与目标  $j$  之间的相关系数,  $n$  为目标数。综合指标之间的对比强度和冲突性, 可以得到第  $j$  项指标所包含的信息量。

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1-r_{ij}) \quad (15)$$

信息量  $C_j$  越大表示第  $j$  项目标的重要性越大, 通过对各项目的信息量归一化可以得到各项指标的权重:

$$w_j = C_j / \sum_{j=1}^n C_j \quad (16)$$

得到目标权重后, 应用灰关联投影法进行多属性决策。记参评方案集合为  $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ , 参评方案目标集合为  $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ , 参评方案  $A_i$  对评价指标  $V_j$  的属性值为  $Y_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ , 称为原始决策矩阵。对于本文来说, Pareto 前沿即为原始决策矩阵。

由于本文中的 3 个目标均为“效益性”指标, 从所有参评方案中选出各项指标的最大值, 作为最优指标  $Y_{0j}$ 。将  $Y_{0j}$  加入到原始决策矩阵中得到的增广矩阵  $Y = (Y_{ij})_{(m+1) \times n} (i=0, 1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$  称为决策矩阵。

对决策矩阵进行无量纲化处理:

$$Y'_{ij} = Y_{ij} / Y_{0j}, \quad i=0, 1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

计算灰色关联系数:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_m \min_n |Y'_{0j} - Y'_{ij}| + \lambda \max_m \max_n |Y'_{0j} - Y'_{ij}|}{|Y'_{0j} - Y'_{ij}| + \lambda \max_m \max_n |Y'_{0j} - Y'_{ij}|} \quad (18)$$

式中, 分辨系数  $\lambda$  为常数, 通常取值为 0.5。灰色关联系数越大说明方案与最优指标越接近。

将目标权重与关联系数相乘后求和, 得到参评方案的灰关联度为

$$D_i = \sum_{j=1}^n \xi_{ij} w_j, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (19)$$

灰关联度最大的方案即为该时步最优机组恢复方案。

## 2.3 基于贪心算法的重要负荷恢复优化

为每一时步确定了机组恢复方案后, 当前重要负荷恢复优化的启动功率约束条件为

$$\sum_{j=1}^{n_k} c_j^3 \beta_j P_{L,j} \leq \sum_{i=1}^{n_k} e_i (P_{G,i}(k\Delta t) - P_{G,i}((k-1)\Delta t)) - \sum_{i=1}^{n_k} c_i^1 P_{\alpha,i} \quad (20)$$

由此, 重要负荷恢复问题可表示为由启动功率约束和负荷恢复目标函数构成的 0/1 背包问题。考虑到单个负荷最大功率约束的限制, 需要在负荷恢复优化之前加入负荷预选机制, 去除越限的重要负荷。

由于重要负荷恢复的后效性不强且优化模型为简单的单目标优化模型, 引入求解单目标 0/1 背包问题常用的贪心算法对该问题进行求解。贪心算法的特点是依次选取当前情况下在某种测度的意义下最优的方案, 得到问题的一个局部最优解<sup>[18]</sup>。该算法虽然无法满足全局最优性, 但求解效率高, 适用于负荷节点众多的情况。根据所选择测度的不同, 贪心算法可以分为价值贪心算法、重量贪心算法和价值密度贪心算法 3 类, 本文选用的是基于价值密度的贪心算法。

## 2.4 算法流程

考虑机组分层的机组与重要负荷协调恢复优化算法流程如图 4 所示。

## 3 算例分析

以新英格兰 10 机 39 节点系统为例, 对本文所提模型和算法的有效性进行验证。算例系统节点及线路如图 5 所示。各电厂机组参数如表 1 所示, 机组编号尾号为 1 表示该机组为网络层机组, 尾号大于 1 的为厂站层机组。例如, 32-1 表示 32 节点的网络层机组, 32-2、32-3 表示 32 节点的厂站层机组。假设 30 节点为黑启动电源且在 0 h 自启动成功。每一时步时长  $\Delta t$  设为 0.25 h。NSGA-II 算法中, 种群大小设置为 200, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.1, 最大迭代次数为 20。

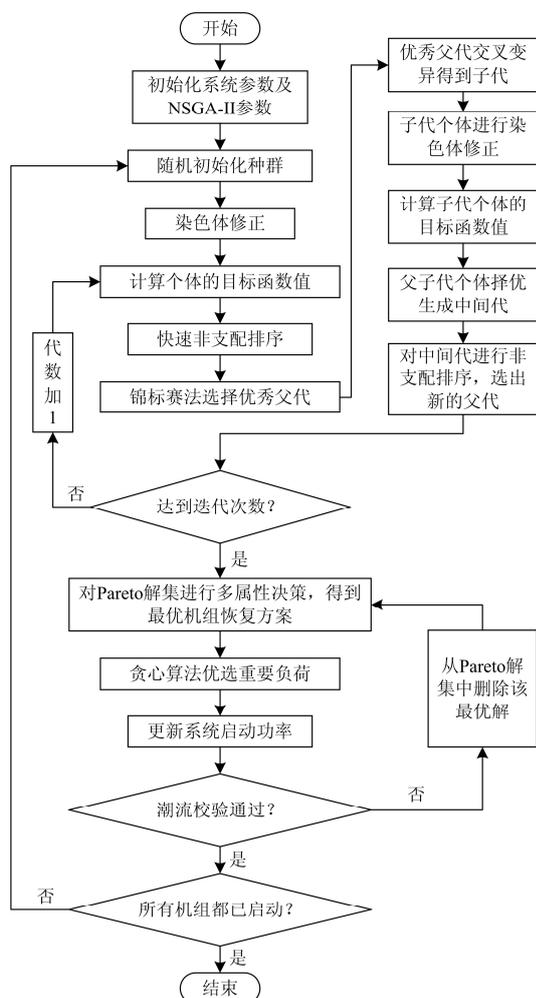


图 4 机组与重要负荷协调恢复优化算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the optimization algorithm for unit restarting coordinated with important load recovery

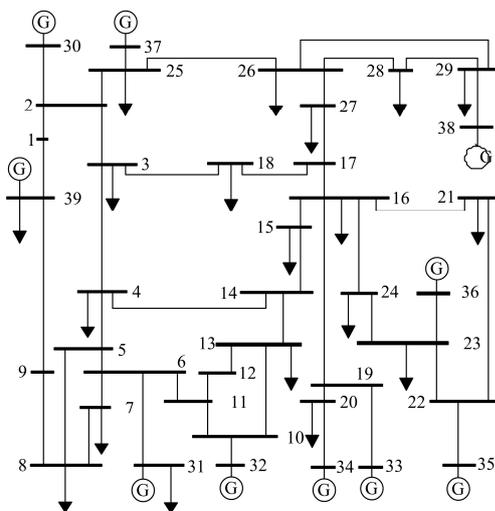


图 5 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig. 5 New England 10-unit 39-bus power system

表 1 各电厂机组参数

Table 1 Unit parameters of each power plant

节点编号	机组编号	$P_M /$ MW	$P_G /$ MW	$K'_p /$ (MW/h)	$T_{ch} /$ h	$T_{cc} /$ h
30	30-1	200	0	/	10	0
31	31-1	600	30	141	10	3
	31-2	600	30	141	10	3
32	32-1	250	12.5	84	10	0
	32-2	250	12.5	84	10	0
	32-3	250	12.5	84	10	0
33	33-1	300	10	81	10	0
	33-2	300	15	62	10	0
34	33-3	200	15	100	10	0
	34-1	300	15	108	3	0
	34-2	300	15	108	3	0
35	35-1	250	12.5	100	10	0
	35-2	250	12.5	100	10	0
	35-3	250	12.5	100	10	0
36	36-1	330	16.5	86	10	0
	36-2	330	16.5	86	10	0
37	37-1	320	16	107	2.33	0
	37-2	320	16	107	2.33	0
38	38-1	300	15	129	10	0
	38-2	300	15	129	10	0
	38-3	300	15	129	10	0
39	39-1	300	15	129	10	0
	39-2	300	10	129	10	0
	39-3	200	10	85	10	0
	39-4	200	10	85	10	0

第一时步的启动功率由黑启动机组 30-1 提供, 启动功率  $\Delta P_{\Sigma}(1) = 200 \times 0.25 = 50$  MW。通过 NSGA-II 算法优化求解得到第一时步机组恢复的 Pareto 最优解集及 Pareto 前沿如表 2 所示。应用 CRITIC 赋权法对 Pareto 前沿进行计算得到 3 个目标的权重为  $W = [0.2510, 0.4587, 0.2903]$ 。采用灰关联投影法对 Pareto 最优解集进行排序, 分别得到 3 种机组恢复方案的灰关联度, 进一步选择灰关联度最大的方案 1 为最终的第一时步机组恢复方案。

第一时步机组恢复占用启动功率 40 MW, 剩余 10 MW 可用于恢复重要负荷。各负荷节点有功功率、重要负荷比例以及负荷权重如表 3 所示, 其中各节点重要负荷的比例为 10%~20% 的随机数。采用贪心算法对重要负荷恢复进行优化。得到第一时步恢复的重要负荷为负荷节点 12 上的重要负荷, 至此第一时步的恢复方案优化过程结束。在为该时步确定了机组和重要负荷协调恢复方案后, 仍剩余的启动功率可用于恢复已恢复供电的负荷节点上的非重要负荷。更新系统状态, 重复上述过程, 直到所有

满足热启动时间限制的机组均获得启动电源,认为整个优化过程结束。完整的机组和重要负荷恢复方案如表 4 所示。

表 2 第一时步机组恢复方案的 Pareto 解集

Table 2 Unit restarting scheme Pareto set of the first time step

方案	恢复的机组	$f_1$	$f_2$	$f_3$	灰关联度 $D$
1	33-1; 38-1; 39-1	900	5.66	339	0.57
2	36-1; 37-1; 39-1	950	3.95	322	0.33
3	33-1; 37-1; 39-1	920	4.84	317	0.37

表 3 重要负荷节点参数

Table 3 Parameters of important load nodes

节点编号	有功功率/MW	重要负荷比例/%	重要负荷有功功率/MW	负荷权重
3	322	16.45	52.98	0.0549
4	500	11.01	55.07	0.0535
7	233.8	13.11	30.67	0.0474
8	522	19.74	103.06	0.0688
12	8.5	14.21	1.20	0.0678
15	320	17.61	56.35	0.0500
16	329.4	12.28	40.45	0.0495
18	158	15.59	24.64	0.0688
20	680	10.43	70.97	0.0433
21	274	13.37	36.65	0.0532
23	247.5	14.82	36.70	0.0683
24	308.6	16.02	49.43	0.0686
25	224	14.44	32.35	0.0668
26	139	12.38	17.22	0.0711
27	281	10.39	29.21	0.0561
28	206	14.27	29.39	0.0432
29	283.5	15.75	44.67	0.0687

第 1—2 时步,主要是网络层机组的启动,机组的启动方案倾向于有利于网架的铺开;第 3—4 时步,网络层机组和厂站层机组都逐渐恢复,网架铺开与系统发电量的增加同时进行,加速了系统的恢复进程;第 5—7 时步,主要是厂站层机组的启动,系统发电量逐渐上升,为后续恢复提供了有力的功率支撑。到第 7 时步末,除了有冷启动时间限制的机组 31-1、31-2 以外,其他机组均已安排恢复。机组恢复前期由于启动功率有限,在保证机组优先恢复的前提下,重要负荷恢复较少,主要恢复一些有功功率较小的重要负荷。到了机组恢复后期,由于机组陆续并网发出有功,系统能够提供的启动功率增多,恢复的重要负荷也增多,所恢复重要负荷的有功功率也更大。结果证明了本文所提出的考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复策略以及相关算法的有效性。

表 4 机组和重要负荷恢复方案

Table 4 Restoration scheme of units and important loads

时步	系统功率/MW	恢复的机组	机组启动功率/MW	恢复的负荷	负荷有功/MW
1	50	33-1; 38-1; 39-1	40	12	1.21
2	50	36-1; 37-1	32.5	26	17.22
3	50	32-1; 35-1; 38-3	40	/	/
4	94.34	34-1; 35-3; 39-2	37.5	18; 27	53.85
5	108.91	32-2; 35-2; 36-2; 39-4	51.5	29	44.67
6	133.56	32-3; 33-2; 34-2; 37-2	58.5	24	49.43
7	283.78	33-3; 38-2; 39-3	40	3, 8; 23; 25	225.09

## 4 结论

本文建立了考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复优化模型。将连续的网架重构过程划分为若干次序进行的多时步恢复过程。针对网络层机组和厂站层机组恢复代价及其对后续恢复过程贡献的不同,确定了总发电功率、恢复路径节点重要度、机组等效爬坡率 3 个优化目标,采用快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解该多目标优化模型,结合 CRITIC 客观赋权法和灰色关联投影法确定单一时步机组分层恢复方案。进一步地,建立了与机组分层恢复配合的重要负荷恢复方案优化模型,结合模糊层次分析法和贪心算法确定该时步重要负荷恢复方案。新英格兰 10 机 39 节点算例验证了本文所提模型和算法的有效性。本文所提方法避免了以往机组恢复方法未考虑同一电厂不同机组恢复的关系的不足,符合工程实际,为电力系统调度运行人员提供了更加丰富的决策支持。

## 参考文献

- [1] BAI Feifei, LIU Yong, LIU Yilu, et al. A measurement-based approach for power system instability early warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 9pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0014-0
- [2] 高翔, 庄侃沁, 孙勇. 西电网“11.4”大停电事故的启示[J]. 电网技术, 2007, 30(1): 25-31.  
GAO Xiang, ZHUANG Kanqin, SUN Yong. Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTE Grid on November 4, 2006[J]. Power System Technology, 2007, 30(1): 25-31.

- [3] 林伟芳, 汤涌, 孙华东, 等. 巴西“2·4”大停电事故及对电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 1-5.  
LIN Weifang, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Blackout in Brazil power grid on February 4, 2011 and inspirations for stable operation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 1-5.
- [4] 孙俊博, 解大, 娄宇成, 等. 充放储一体化电站的黑启动方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 43-50.  
SUN Junbo, XIE Da, LOU Yucheng, et al. Black-start scheme for charging-discharging-storage integrated station[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 43-50.
- [5] 李文云, 杨强, 李玲芳, 等. 云南电网“黑启动”及快速恢复方案探讨[J]. 云南电力技术, 2002, 30(4): 1-4.  
LI Wenyun, YANG Qiang, LI Lingfang, et al. Discussion on scenarios of black-starting & fast resuming of Yunnan Power Grid[J]. Yunnan Electric Power, 2002, 30(4): 1-4.
- [6] SUN W, LIU C C, ZHANG L. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1357-1366.
- [7] 王江宇, 刘艳. 基于重构方案线路投运风险最小的机组恢复顺序优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 68-75.  
WANG Jiangyu, LIU Yan. Optimization of units' restoration sequence based on minimizing of lines' restoration risk corresponding to reconfiguration scheme[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 68-75.
- [8] 刘翔宇, 胡雪凯, 胡文平, 等. 考虑线路操作时限和恢复概率的机组启动路径优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 24-29.  
LIU Xiangyu, HU Xuekai, HU Wenping, et al. Optimization of unit restoration sequence considering line start-up time and restoration probability[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 24-29.
- [9] 张璨, 林振智, 文福拴, 等. 计及机组恢复效益和线路综合重要度的网络重构优化策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 80-87.  
ZHANG Can, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. An optimization strategy for network reconfiguration employing restoration benefits of generating units and comprehensive importance indices of lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 80-87.
- [10] 朱海南, 刘玉田. 考虑线路投入顺序的网架重构机组恢复多目标优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 53-59.  
ZHU Hainan, LIU Yutian. Multi-objective optimization of unit restoration during network reconstruction considering line restoration sequence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 53-59.
- [11] GU X, ZHONG H. Optimization of network reconfiguration based on a two-layer unit-restarting framework for power system restoration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(7): 693-700.
- [12] 刘艳, 顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 20-27.  
LIU Yan, GU Xueping. Node importance assessment based skeleton-network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 20-27.
- [13] 刘强, 石立宝, 周明, 等. 电力系统恢复中机组恢复的优化选择方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 164-170.  
LIU Qiang, SHI Libao, ZHOU Ming, et al. Optimal strategy for units start-up during power system restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 164-170.
- [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] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [16] DIAKOULAKI D, MARVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [17] 吕锋, 崔晓辉. 多目标决策灰色关联投影法及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1): 103-107.  
LÜ Feng, CUI Xiaohui. Multi-criteria decision grey relation projection method and its application[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2002, 22(1): 103-107.
- [18] 牛映武. 运筹学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2005: 186-188.

收稿日期: 2016-09-04; 修回日期: 2016-11-30

作者简介:

李凯(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制; E-mail: li\_kai141@163.com

李少岩(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制;

顾雪平(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御与系统恢复、智能技术在电力系统中的应用。

(编辑 周金梅)