

# 基于病毒进化改进 NSGA-II 算法的扩展黑启动多目标优化

陈亮<sup>1</sup>, 顾雪平<sup>1</sup>, 贾京华<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 河北电力调度通信中心, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 为了保证黑启动小系统的安全恢复和合理兼顾多目标优化方法的快速搜索与局部搜索, 提出基于病毒进化改进 NSGA-II 算法的综合功率支持和恢复安全裕度的扩展黑启动方案多目标优化方法。以初期阶段内发电量加权和最大化、电压稳定裕度最大化和维持节点电压在满意水平为目标建立多目标优化模型。在快速非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 的染色体中引入生物病毒机制和病毒感染操作, 利用病毒的横向感染对解空间进行局部搜索, 避免强化全局寻优时的前沿退化。然后结合基于病毒进化改进 NSGA-II 算法与最短路径法对扩展黑启动方案求解出 Pareto 最优解集。以新英格兰 10 机 39 节点系统和河北南网实际系统为算例验证所提方法的有效性, 该方法为决策者提供了更全局性的选择空间, 从而保证扩展黑启动小系统安全可靠地恢复更多出力。

**关键词:** 电力系统恢复; 扩展黑启动; 恢复安全裕度; 多目标优化; 快速非支配排序遗传算法; 病毒进化

## Multi-objective extended black-start schemes optimization based on virus evolution improved NSGA-II algorithm

CHEN Liang<sup>1</sup>, GU Xue-ping<sup>1</sup>, JIA Jing-hua<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Power Dispatch and Communication Center, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** To ensure the safe recovery of the black-start system and well synthesize the quick search and local search of multi-objective optimization method, an extended black-start multi-objective optimization method based on virus evolution improved NSGA-II algorithm considering power support and restoration security margin comprehensively is proposed. The optimization goals are designed to maximize the total weighted power generation output (MWh) of the black-start system, to maximize voltage stability margin and to maintain bus voltage at a satisfactory level. Biological virus mechanism and the infection-based operation are introduced into the chromosome of the fast and elitist non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). Horizontal infection of the virus is applied to improve local search capability in solution space and avoid the frontier degradation. The virus evolution improved NSGA-II algorithm and the Dijkstra algorithm are employed to solve the Pareto-optimal solutions of the extended black-start schemes. The effectiveness of the proposed method is validated by the optimization results on the New England 10-unit 39-bus power system and the southern power system of Hebei province. The method can provide decision-makers with greater choice of space and guarantee the extended initial black-start power system to recover more power generation output safely and reliably.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2011502025).

**Key words:** power system restoration; extended black-start; restoration security margin; multi-objective optimization; fast and elitist non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II); virus evolution

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0035-08

## 0 引言

黑启动阶段是电力系统大停电后恢复的首个阶段, 成功安全地进行黑启动, 进而形成独立稳定的

黑启动小系统, 为整体恢复过程奠定了基础, 并且黑启动小系统的恢复效果也直接影响系统的后续恢复进程<sup>[1-2]</sup>。例如, 在美加“8·14”大停电后实际恢复过程<sup>[3]</sup>中, 由于计划不周以及初期黑启动小系统未能稳定运行, 导致恢复方案执行中断, 延误了整体的恢复进程。

文献[4]结合上海电网黑启动试验和仿真分析

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (20110036110007); 河北省自然科学基金项目 (E2011502025)

出在黑启动阶段电压下降是影响黑启动小系统初期稳定运行的最主要因素。根据目前电力系统中黑启动的装机容量和运行性能,文献[5]创新地提出一个黑启动电源同时启动多个电厂的扩展黑启动恢复策略,所形成的扩展黑启动系统可为后续恢复提供更大的功率支持,是大停电后电力系统恢复研究的一个新探索。但是在同时启动多台机组的扩展黑启动方案中,电压下降对系统恢复的安全性影响更大,在优化扩展黑启动小系统发电量最大化过程中,仅将电压幅值作为约束条件,最终电压幅值趋向于允许下限值。在河北南网算例中恢复过程的最低电压为 0.801pu,如果此时出现扰动,则对整个黑启动恢复过程影响巨大,很有可能导致恢复失败。目前国内学者对黑启动阶段的研究工作集中在黑启动阶段的技术问题、实际电网的黑启动预案及试验研究和黑启动方案评估三个方面<sup>[6-8]</sup>,但黑启动方案的优化目标都是单纯追求效益型指标最大化,如初期阶段的发电量最大化<sup>[5]</sup>,将电源点尽量分散在骨架网络上<sup>[9]</sup>,这些都是以牺牲黑启动小系统初期的恢复安全裕度为代价。可见,上述这些黑启动方案都没有将恢复安全裕度纳入黑启动方案的目标集,因此目前的黑启动方案并不能保障黑启动小系统可靠恢复。

对扩展黑启动方案进行功率支持和恢复安全裕度的全面优化,则该问题为一个典型的多目标优化问题。近年来,国内外学者对多目标优化求解进行了深入的研究:多目标差分进化算法<sup>[10]</sup>、多目标粒子群优化算法<sup>[11]</sup>等。其中,引入快速非支配排序算法、个体拥挤距离算子和精英策略的非支配排序遗传算法 (Nondominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II)<sup>[12]</sup>是一种求解多目标优化问题的 Pareto 最优解集的优秀进化算法,可有效地避免求解的目标偏好性,降低计算的复杂度,同时保证种群多样性,但是在强化全局寻优时容易引起前沿退化。而病毒进化遗传算法 (Virus Evolution Genetic Algorithm, VEGA)<sup>[13]</sup>是基于病毒原理的协同进化算法,通过病毒种群和宿主种群的分工协作实现了继承信息在父代与子代群体间的纵向传递,同时也完成了进化基因在不同种群间的横向传播,有效解决了 NSGA-II 算法的快速搜索与易陷入局部最优解这对矛盾。但由于 VEGA 算法缺少精英保留策略,优秀的病毒个体可能在进化过程中被丢弃。

为了克服上述研究中的不足,本文首先分析影响黑启动小系统恢复安全的主要因素,提取出反映扩展黑启动方案的恢复安全裕度的指标,并将其纳入到全面优化恢复效果的目标集。然后本文提出一种基于病

毒进化改进的 NSGA-II 算法 (Virus Evolution Nondominated Sorting Genetic Algorithm, VENSIGA),将多目标解空间分为并行的两部分——主个体和病毒个体,通过 NSGA-II 算法对主个体纵向遗传并且快速非支配排序,利用病毒感染个体的横向感染传递遗传信息,在同代之间实现局部搜索,将纵向遗传和横向感染相结合。同时,采用 NSGA-II 中的精英保留策略,将被病毒个体感染后的优秀主个体直接进入子代。最后结合 VENSIGA 算法与最短路径 Dijkstra 法求解出扩展黑启动方案的 Pareto 最优解集。

## 1 考虑恢复安全的扩展黑启动多目标优化模型

### 1.1 目标函数

电压下降是影响黑启动小系统初期恢复的最主要因素<sup>[4]</sup>,所以本文重点研究电压稳定水平对恢复安全的影响,提取出反应恢复安全裕度的成本型指标:电压稳定裕度和节点电压水平,并将其纳入优化目标集,进而本文兼顾功率支持和恢复安全裕度,建立扩展黑启动方案的多目标优化模型。

#### 1) 电压稳定裕度

Kessel 等<sup>[14]</sup>提出的 L 指标是从一个已解的潮流中取得变量和参数来量化表征系统的稳定裕度,其计算简单、直观性强,在电力系统中应用较广。L 指标计算要求将系统节点分成机组节点和负荷节点两组,因为在黑启动阶段需要启动待恢复电厂的厂用电,所以此时待恢复电厂节点相当于系统的负荷节点,黑启动电源节点相当于系统的机组节点。将 L 指标运用到扩展黑启动小系统中,则需将机组节点分为两组:一组包含所有待恢复机组节点 (R-node),定义为  $\alpha_R = \{1, 2, \dots, n_R\}$ ;另一组包含所有黑启动电源节点 (B-node)  $\alpha_B = \{n_R + 1, n_R + 2, \dots, n\}$ ,则黑启动小系统的节点方程为

$$\begin{bmatrix} I^R \\ I^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U^R \\ U^B \end{bmatrix} \quad (1)$$

将 Y 参数转换为 H 参数得

$$\begin{bmatrix} U^R \\ I^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_3 & H_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^R \\ U^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{RR} & \mathbf{F}^{RB} \\ \mathbf{K}^{BR} & \mathbf{Y}^{BB} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^R \\ U^B \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{Z}^{RR}$ ,  $\mathbf{F}^{RB}$ ,  $\mathbf{K}^{BR}$ ,  $\mathbf{Y}^{BB}$  分别为混合矩阵的子矩阵;  $U^R, I^R, U^B, I^B$  分别为待恢复机组节点和黑启动电压节点的电压和电流。

对每一个待恢复机组节点  $j \in \alpha_R$ , 可求解局部指标  $L_j$  为

$$L_j = \left| 1 - \frac{\sum_{i \in \alpha_B} F_{ji} U_i}{U_j} \right| \quad (3)$$

式中:  $U_i$  为第  $i$  个黑启动电源节点的复电压,  $i \in \alpha_B$ ;  $U_j$  为第  $j$  个待恢复机组节点的复电压,  $j \in \alpha_R$ ;  $F_{ji}$  为负荷参与因子, 它是  $F^{RB}$  矩阵的第  $j$  行、第  $i$  列元素;  $F^{RB}$  矩阵为节点导纳矩阵  $Y$  进行部分求逆所得混合矩阵  $H$  的子矩阵。

定义黑启动小系统的电压稳定指标  $L$  为

$$L = \max_{j \in \alpha_R} (L_j) \quad (4)$$

系统稳定状态对应  $L < 1.0$ ; 当系统趋于失稳时,  $L \rightarrow 1.0$ 。根据  $L$  与 1.0 的距离, 可表征扩展黑启动恢复方案的稳定裕度。因此将电压稳定指标  $L$  最小化作为目标函数之一, 以使恢复方案的电压稳定裕度最大。

$$f_1 = L = \max_{j \in \alpha_R} (L_j) \quad (5)$$

## 2) 节点电压水平

节点电压值是评价系统安全性<sup>[15]</sup>的重要指标之一。在目前的黑启动方案优化中, 通常是将电压幅值作为约束条件, 那么在黑启动小系统发电量最大化过程中, 电压幅值将接近于允许下限值。因此, 本文为维持电压在满意水平上, 则将电压与指定电压的偏差作为目标函数之一, 可表示为

$$f_2 = \sum_{j=1}^{N_R} \left( \frac{U_j - U_j^*}{U_{j\max} - U_{j\min}} \right)^2 \quad (6)$$

式中:  $U_j$  第  $j$  个待恢复机组节点的复电压;  $U_j^*$  为其指定电压幅值, 通常取  $U_j^* = 1$ ;  $U_{j\max} - U_{j\min}$  为节点  $j$  允许的最大电压偏差。

## 3) 功率支持—加权发电量最大

对后续恢复的功率支持效果采用扩展黑启动小系统在优化时间段内加权发电量来表征, 以综合考虑被启动机组的容量、机组启动时间及机组启动后的爬坡率三个因素<sup>[5]</sup>, 即

$$f_3 = - \sum_{i=1}^{n_G} \int_{k\Delta t}^{T_1} c_i \gamma(t) P_{Gi}(t) dt \quad (7)$$

式中:  $T_1$  为优化时间;  $c_i$  表示机组  $i$  是否在本时段投入, 投入为 1, 否则为 0;  $\gamma(t)$  为机组出力不同时段内的权重, 随着时间推移,  $\gamma(t)$  的取值逐渐减小;  $P_{Gi}(t)$  为机组  $i$  在时间  $t$  时刻发出的有功功率, 其值由机组启动时间、升负荷率、机组额定功率等参数决定, 其值由图 1 所示的简化机组出力曲线求得。

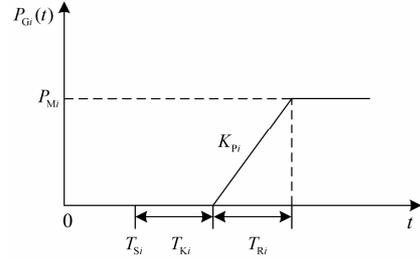


图 1 机组出力曲线

Fig. 1 Power output curve of a generating unit

最后结合式 (5) ~ 式 (7), 综合考虑功率支持和恢复安全裕度的扩展黑启动方案的多目标函数可表示为

$$\min : F = [f_1, f_2, f_3] \quad (8)$$

## 1.2 约束集

扩展黑启动方案的约束集包括系统运行约束 (无功约束、自励磁约束和潮流约束等) 和机组启动约束 (启动功率约束和启动时间约束)。

### (1) 无功约束和发电机自励磁约束

因黑启动初期空投线路所产生的充电无功功率将可能发生持续工频过电压<sup>[5]</sup>。因此无功约束为

$$\sum_{j=1}^{n_L} Q_{Lj} < \sum_{r=1}^{n_B} Q_{Br,\max} \quad (9)$$

式中:  $n_L$  为扩展黑启动方案中恢复的路径数;  $Q_{Lj}$  为线路  $j$  ( $j=1, 2, \dots, n_L$ ) 的充电无功功率;  $n_B$  为黑启动电源机组的台数;  $Q_{Br,\max}$  为黑启动电源机组  $r$  能吸收的最大无功功率。

工程实际中, 发电机自励磁约束为

$$\sum_{j=1}^{n_L} Q_{Lj} < \sum_{r=1}^{n_B} K_{CB,r} S_{B,r} \quad (10)$$

式中:  $K_{CB,r}$  为黑启动机组  $r$  的短路比;  $S_{B,r}$  为黑启动机组  $r$  的额定容量。

无功约束与自励磁约束可合并为一个充电功率

约束:  $Q_b = \min(Q_{B\sum,\max}, \sum_{r=1}^{n_B} K_{CB,r} S_{B,r})$ , 则  $\sum_{j=1}^{n_L} Q_{Lj} < Q_b$ 。

### (2) 潮流约束

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} & i = 1, 2, \dots, n_0 \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} & i = 1, 2, \dots, n_0 \\ P_i \leq P_{i\max} & i = 1, 2, \dots, n_L \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} & i = 1, 2, \dots, n_b \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $n_0$  为已恢复系统中发电机的总台数;  $P_i$  为支路  $i$  上流过的有功功率;  $n_L$  为已恢复系统中线路的总数;  $U_i$  为节点电压;  $n_b$  为已恢复系统中的节点总数。

(3) 机组启动功率约束

所有待恢复机组所需的启动功率之和应小于黑启动小系统所能提供的启动功率之和, 即

$$P_0(t) + \sum_{j=1}^{n_G} e_j P_{Gj}(t) - \sum_{i=1}^{n_G} P_{cr,i} > 0 \quad (12)$$

式中:  $P_0(t)$ 是黑启动电源提供的启动功率, 其值随着恢复进程而变化; 式中  $\sum_{j=1}^{n_G} e_j P_{Gj}(t)$  表示已并网机组所提供的功率,  $e_j$ 表示机组并网状态, 已并网是1, 否则为0;  $P_{cr,i}$ 是机组*i*所需的启动功率。

(4) 机组启动时间约束

为使扩展黑启动方案中待启动火电机组快速启动, 应选择热启动的机组, 则机组启动时间约束为

$$T_{CH,i} > t_0 \quad (13)$$

式中:  $T_{CH,i}$ 为机组*i*的最大临界热启动时间;  $t_0$ 为路径恢复时间。

## 2 基于 VENSQA 算法的扩展黑启动多目标优化

### 2.1 VENSQA 算法的基本思想

为求解扩展黑启动方案的多目标优化问题, 本文提出一种基于病毒进化操作来改进 NSGA-II 算法。在 NSGA-II 算法的染色体中引入生物病毒机制和病毒感染操作, 将多目标解空间分为并行的两部分——主个体和病毒个体。通过 NSGA-II 算法对主个体纵向遗传并且快速非支配排序; 利用病毒感染个体的横向感染来传递遗传信息, 保证个体的多样性和对解空间的局部搜索。这使得纵向遗传和横向感染相结合, 全局搜索同局部搜索相结合。同时, 采用 NSGA-II 中的精英保留策略, 将被病毒个体感染后的优秀主个体直接进入子代, 以防止获得的 Pareto 最优解丢失。

### 2.2 染色体结构设计

(1) 主个体染色体结构设计

每个染色体代表一种扩展黑启动的恢复方案, 电力系统有  $n$  个待恢复机组节点, 则该恢复方案可表示成长度为  $n$  的染色体, 若某机组节点被选中, 则在状态序列对应的位置取 1, 否则取 0。随机产生主个体的初始种群  $H(t)$ 。

(2) 病毒个体染色体结构设计

病毒个体是从主个体中抽取的子串, 也表示为长度为  $n$  的染色体, 但是加入了通配符“\*”。如 01\* \* 0\* 1 是产生于主个体 0110011 的病毒个体。病毒个体的染色体编码设计加强了病毒感染时与主个体的亲和性和感染的基因跨度。

### 2.3 适应度设计

(1) 主个体的快速非支配排序和拥挤距离设计  
快速非支配排序<sup>[9]</sup>是按主个体的非劣解水平对种群分层, 向 Pareto 最优解的方向进化。而主个体拥挤距离算子, 是为优先选择拥挤距离较大的个体, 保证种群多样性。

(2) 病毒个体适应度计算

病毒个体的优劣是由病毒个体的适应度函数表征, 即用它所感染的若干主个体前后适应度函数的变化来表征。假设病毒  $i$  所感染的主个体的集合为  $U$ ,  $U$  中主个体  $l$  被感染前后的适应度函数分别表示为  $fit_{host_l}$ 、 $fit_{host'_l}$ , 则病毒  $i$  的适应度函数为

$$fit_{virus_i} = \sum_{l \in U} (fit_{host'_l} - fit_{host_l}) \quad (14)$$

### 2.4 进化操作

(1) 主个体的选择、交叉和变异运算

选择运算采用轮赛制选择算子, 然后采用 SBX(Simulated Binary Crossover)算子和正态变异算子<sup>[12]</sup>, 进行交叉和变异操作, 得到子代种群  $off_H(t)$ 。

(2) 病毒个体的感染操作

病毒个体的感染操作包括反向转录和转导算子两种操作。在感染过程中建立一个优秀病毒库, 将病毒的优秀个体即感染能力强的个体存储, 以更好地对病毒进行实时更新。

反向转录: 病毒传染操作。每个病毒个体以自身基因概率  $P_{infect}$  覆盖主染色体中的相应基因片段进而得到新主染色体。如果被感染主个体的适应度减少, 则在主个体中随机选出与病毒等长的基因片段被病毒模式取代。如图 2 所示, 病毒中某段为 001, 则主染色体对应的基因片段被 001 取代, 反向转录突变出新的主染色体。

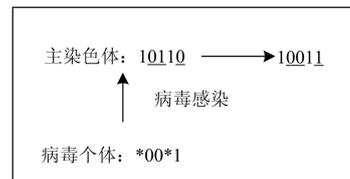


图 2 病毒感染操作

Fig. 2 Virus infection operation

转导算子: 病毒从主染色体中析取子串, 作为新的病毒个体。借助病毒因子从一种个体转移到另一个体, 其目的是产生新的病毒个体。在病毒感染操作之后, 每个病毒按照概率  $fit_{virus_i}$  进行结合进化, 如果  $fit_{virus_i} > 0$ , 病毒个体从感染的主染色体中析取新的子串来完成自己的进化。如果  $fit_{virus_i} < 0$ , 病毒将删除自身的一些字符串, 即为

复制和删减操作:

①复制(copy), 如图 3 所示, 随机选择一个主个体, 主染色体的基因以概率  $P_{copy}$  替换病毒个体中相应基因, 产生不少于当前有效字符的新病毒个体。初始病毒个体也通过复制操作产生, 即通过一个主染色体, 以概率  $N_{virus}$  复制到一个无感染能力的病毒个体上。

②删减(cut), 如图 4 所示, 病毒染色体中的基因片段以概率  $P_{cut}$  被通配符删减。

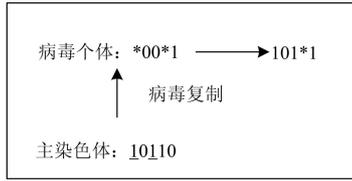


图 3 病毒复制操作

Fig. 3 Virus copy operation

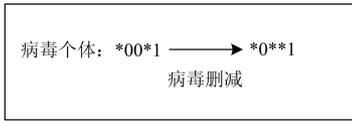


图 4 病毒删减操作

Fig. 4 Virus cut operation

病毒的生存时间用生命力(life)来表现, 第  $t+1$  代的病毒个体  $i$  的生命力表示为

$$life_{i,t+1} = \gamma \times life_{i,t} - fit_{virus_i} \quad (15)$$

其中:  $\gamma$  为生命力递减率; 若  $life_{i,t+1} = 0$  说明该病毒死亡, 此时需要产生新的病毒个体以维持种群规模。

病毒的实时更新是根据病毒个体生命力的衰减以及染色体相似度标准对病毒群体进行实时更新。

### 2.5 精英进化策略

为防止主个体在父代中的优秀个体在进化过程中被丢弃, 采用精英进化策略。即保留父代中的优良个体以及被病毒个体感染后的优秀主个体, 直接进入子代避免陷入局部最优。

### 2.6 精英个体校验模块

首先根据迪克斯特拉(Dijkstra)算法为各恢复机组节点搜索送电路径, 计算各恢复方案的线路充电功率和所需启动功率, 判断该扩展黑启动方案是否满足线路充电功率及启动功率约束, 若满足保留该扩展黑启动方案, 否则放弃。然后对方案进行系统的潮流和节点电压约束校验。最后对发生潮流越限的方案进行调整<sup>[9]</sup>, 若灵敏度调节量在允许范围内则方案校验通过可行, 否则, 记作不可行方案。

基于 VENSQA 算法和 Dijkstra 算法的扩展黑启动多目标优化流程如图 5 所示。

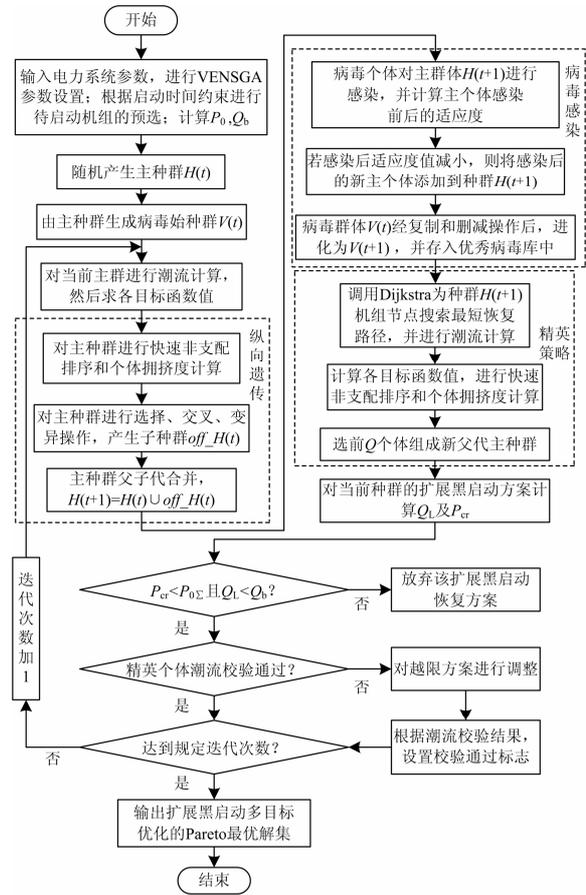


图 5 基于 VENSQA 和 Dijkstra 算法扩展黑启动多目标优化流程

Fig. 5 Flowchart of multi-objective extended black-start optimization based on VENSQA and Dijkstra algorithm

## 3 算例与结果分析

### 3.1 算例 1

为验证本文所提方法的有效性, 首先采用图 6 所示的新英格兰 10 机 39 节点系统为例, 对扩展黑启动方案进行优化研究。为与文献[5]扩展黑启动方案比较, 本文采用与之相同的参数假设。设 33 号节点为大型抽水蓄能电厂, 作为系统黑启动电源。

本文利用基于病毒改进的 NSGA-II 算法对扩展黑启动方案进行优化求解, VENSQA 算法参数设置如下: 主种群大小为 100, 病毒种群大小为 10, 交叉概率取 0.6, 变异率取 0.05, 初始感染概率取 0.02, 最大感染概率 0.02, 复制率取 0.2, 剪切率取 0.1, 生命递减率取 0.9, 最大进化次数为 100 次。

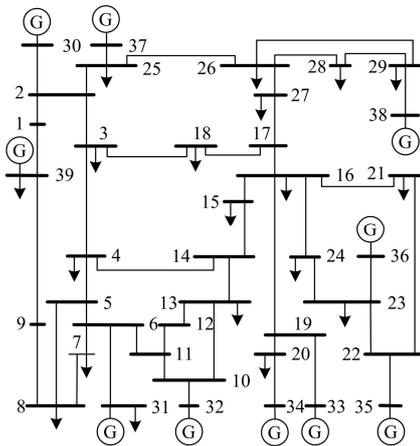


图6 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig. 6 New England 10-unit 39-bus power system

表 1 列出具有代表性的 Pareto 最优解集和相应的 Pareto 前沿。采用文献[16]的模糊决策方法对表 1 中的 Pareto 最优解集进行多属性决策, 进而挑选出满意的最终解。首先求解发电量、电压偏差和电压稳定指标三个目标函数的隶属度, 然后计算各方案的模糊满意度, 满意度越大方案越优。

表 1 扩展黑启动多目标优化方案

Table 1 Schemes of multi-objective extended black-start optimization

方案	恢复机组节点	发电量/MWh	电压偏差	电压稳定指标	模糊满意度
1	34	378.47	0.062	0.358	45.78
2	34, 35	752.19	0.186	0.596	74.06
3	34, 35, 36	1 030.6	0.487	0.812	62.32

### 3.2 算例 2

为进一步验证本文所提方法在实际电力系统中的实用性, 以河北南网(96 个厂站节点, 19 个发电厂, 187 条线路)为算例, 对其扩展黑启动方案进行多目标优化。本文仍采用与文献[5]相同的参数假设, 其中张河湾抽水蓄能电厂为黑启动电源。

将本文的 VENSQA 算法与 NSGA-II 算法所得结果进行比较, 相应的 Pareto 解空间的分布情况如图 7、图 8 所示。

### 3.3 结果分析

在新英格兰 10 机 39 节点系统算例中, 由表 1 的模糊满意度值知, 方案 2 为本文最优的扩展黑启动方案: G<sub>33</sub>-G<sub>34</sub>-G<sub>35</sub>。方案 1: G<sub>33</sub>-G<sub>34</sub> 为最优的传统黑启动方案(黑启动电源只启动一台待启动机组)所提供的发电量 378.47 MWh 小于本文优化得出的扩展黑启动方案所提供的发电量 752.19 MWh。方案 3: G<sub>33</sub>-G<sub>34</sub>-G<sub>35</sub>-G<sub>36</sub> 是文献[5]中最优扩展黑启动

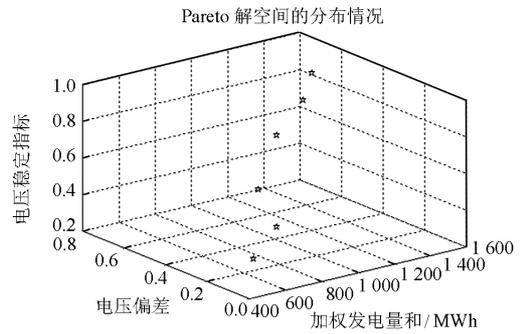


图 7 NSGA-II 算法的 Pareto 解空间的分布情况

Fig. 7 Distribution of Pareto objective values based on NSGA-II algorithm

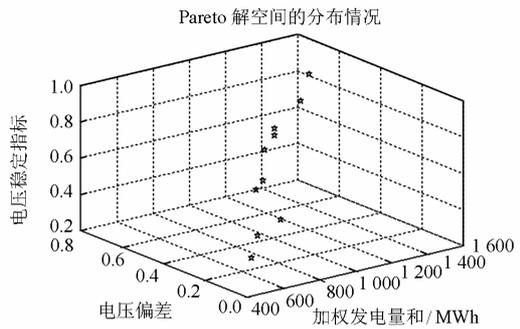


图 8 VENSQA 算法的 Pareto 解空间的分布情况

Fig. 8 Distribution of Pareto objective values based on VENSQA algorithm

方案, 由于只考虑黑启动小系统的发电量最大化, 以牺牲系统的恢复安全裕度为代价, 电压偏差为 0.487、电压稳定指标为 0.812 分别高于本文优化得出的扩展黑启动方案的电压偏差 0.186 和电压稳定裕指标 0.596(电压偏差和电压稳定指标均为成本型属性指标, 属性指标越小对系统越有益)。

在河北南网算例中, VENSQA 算法在求解大规模的多目标优化问题上更具有优势。由图 7、图 8 所示的 VENSQA 和 NSGA-II 算法的 Pareto 解集分布情况可知, VENSQA 算法的最终解集覆盖范围比 NSGA-II 算法广, VENSQA 算法的 Pareto 解集分布也更加均匀且多样性更好, 有效地解决了 NSGA-II 算法在强化全局寻优时前沿退化的问题。可见, 采用 VENSQA 算法优化得到的扩展黑启动的 Pareto 最优解集在目标空间上分布更加均匀, 改善了 NSGA-II 算法的全局搜索能力和局部搜索能力, 可为决策者提供更全局性的选择空间。本文的扩展黑启动方案多目标优化方法, 避免了对多目标进行加权求解的盲目性, 优化的扩展黑启动方案很好地兼顾功率支持和恢复安全。

## 4 结论

本文将恢复安全裕度指标引入到黑启动恢复优化中,该方法将黑启动小系统发电量加权和最大化、电压稳定裕度最大化和维持节点电压在满意水平作为目标建立扩展黑启动多目标优化模型。本文提出一种基于病毒进化改进的 NSGA-II 算法 (VENSGA),引入生物病毒机制和病毒感染操作,利用病毒的横向感染来保证个体的多样性和对解空间的局部搜索,有效地解决了 NSGA-II 算法在强化全局寻优时前沿退化的问题。VENSGA 算法为决策者提供了更全局性的选择空间,并且优化得到的扩展黑启动方案与传统黑启动方案相比,能增发更多的功率;与单纯追求效益型指标的扩展黑启动方案相比,能保留合适的恢复安全裕度。本文提出的方法可以保证扩展黑启动小系统安全可靠地恢复更多出力,对提高电力系统恢复效果具有较强的实际应用价值。

## 参考文献

- [1] Lester H F, Lion K L, Liu C C. From generic restoration to specific restoration strategies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 745-752.
- [2] Lindstorm R R. Simulation and field test of the black start of a large coal-field generating station utilizing small remote hydro generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 162-168.
- [3] 何大愚. 一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 1-5.  
HE Da-yu. Rethinking over ‘8.14’US-CANADA blackout after one year[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 1-5.
- [4] 陶玉华, 杨增辉, 祝瑞金, 等. 黑启动时大功率电动机启动对系统影响的研究[J]. 华东电力, 2007, 35(5): 48-50.  
TAO Yu-hua, YANG Zeng-hui, ZHU Rui-jin, et al. Influence of start-up of large power motors on systems in time of black starts[J]. East China Electric Power, 2007, 35(5): 48-50.
- [5] 顾雪平, 钟慧荣, 贾京华, 等. 电力系统扩展黑启动方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 25-32.  
GU Xue-ping, ZHONG Hui-rong, JIA Jing-hua, et al. Extended black-start schemes of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 25-32.
- [6] 李如琦, 唐林权, 凌武能, 等. 基于前景理论和灰关联分析法的黑启动方案优选[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 103-108.  
LI Ru-qi, TANG Lin-quan, LING Wu-neng, et al. Optimization of black-start based on prospect theory and grey relational analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 103-108.
- [7] 申家琪, 李曼岭, 胡红线, 等. 新乡电网黑启动试验的具体实践[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 39(18): 120-123.  
SHEN Jia-qi, LI Man-ling, HU Hong-xian, et al. Concrete practice of black start of Xinxiang power grid[J]. Power System Technology, 2009, 39(18): 120-123.
- [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 Hui-rong, GU Xue-ping, ZHU Ling-xin. Optimization of load restoration during network reconfiguring process of black-start restoration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 26-32.
- [9] 朱冬雪, 顾雪平, 钟慧荣. 电力系统大停电后机组恢复的多目标优化方法[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 814-820.  
ZHU Dong-xue, GU Xue-ping, ZHONG Hui-rong. A multi-objective optimization method for post-blackout unit restoration[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 814-820.
- [10] 邱威, 张建华, 刘念朱. 考虑环境因素和电压稳定性的多目标最优潮流[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 190-197.  
QIU Wei, ZHANG Jian-hua, LIU Nian-zhu. Multi-objective optimal power flow considering environmental factor and voltage stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 190-197.
- [11] 郑晓, 张静, 马韬韬, 等. 基于改进决策方法的电力系统多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 151-156.  
ZHENG Xiao, ZHANG Jing, MA Tao-tao, et al. Power

- system multi-objective optimization dispatch based on an improved decision-making method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 151-156.
- [12] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 145-151.
- FENG Shi-gang, AI Qian. Application of fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 145-151.
- [13] Kenned Y J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C] // Proceeding of 1997 International Conference on Systems, Man and Cybematics Orlando: IEEE, 1997: 4104-4108.
- [14] Kessel P, Glavitsch H. Estimating the voltage stability of a power system[J]. IEEE T-PWPD, 1986, 1(3): 346-354.
- [15] 刘佳, 李丹, 高立群, 等. 多目标无功优化的向量评价自适应粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 22-28.
- LIU Jia, LI Dan, GAO Li-qun, et al. Vector evaluated adaptive particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 22-28.
- [16] 马瑞, 穆大庆, 李欣然, 等. 电力市场中日有功负荷多目标分配模糊决策的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 25-29.
- MA Rui, MU Da-qing, LI Xin-ran, et al. Study on fuzzy decision of multi-objective dispatch strategy for daily active power in electric market[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 25-29.

---

收稿日期: 2013-04-21; 修回日期: 2013-05-25

作者简介:

陈亮(1989-), 男, 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: Raymond05@aliyun.com

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

贾京华(1963-), 男, 工学学士, 高级工程师, 主要研究方向为电网调度运行和控制。