

考虑后续恢复影响的扩展黑启动方案 多目标优化与决策

陈 亮¹, 顾雪平¹, 贾京华²

(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: 综合考虑恢复初期阶段和后续阶段, 提出一种扩展黑启动方案的多目标优化方法。以初期阶段内加权发电量最大化、尽快搭建系统的骨架网络和选择运行性能尽可能利于后续系统电压调整的被启动机组为优化目标, 综合考虑机组启动约束和系统运行约束, 建立扩展黑启动方案的多目标优化模型, 然后结合快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)与 Dijkstra 法对扩展黑启动方案求解出 Pareto 最优解集。最后综合决策者的偏好因素和决策矩阵的客观信息, 进行基于模糊熵权的 Vague 集多属性决策分析, 选取出最满意的扩展黑启动优化方案。以新英格兰 10 机 39 节点系统为算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 电力系统; 黑启动; 系统恢复; 优化; 约束; 决策; Vague 集; 模糊熵; 模型

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.024

0 引言

电力系统大停电后的黑启动恢复可分为初期黑启动阶段和系统后续恢复阶段^[1-2]。黑启动阶段是整个恢复过程的基础和前提^[3], 同时合理的黑启动方案能有效地加快后续网架重构、负荷恢复的进程。由于目前黑启动电源能提供较大的初始启动功率和吸收多条恢复路径上的充电无功功率, 可以在黑启动阶段同时启动多台被启动机组, 因此文献^[4]提出一种黑启动电源同时启动多个待启动电厂的扩展黑启动的恢复策略, 与 1 个黑启动电源仅启动 1 个待启动电厂的常规黑启动方案相比, 更利于后续网架的重构进程, 进而加快整个系统的全面恢复。因此相比传统黑启动方案, 扩展黑启动方案中的初期黑启动阶段和系统后续恢复阶段存在重叠, 联系也更加紧密, 扩展黑启动方案的优劣不仅要看初期黑启动小系统恢复的效果, 还要对系统的后续恢复最为有利。

目前国内外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 3 个方面^[5-7], 但都以黑启动阶段的初期恢复效果为目标, 并且文献^[4]扩展黑启动方案优化也只考虑了扩展黑启动的初期小系统的加权发电量最大化。可见, 上述黑启动方案都没有将系统后期恢复的影响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对后续恢复进展最为有利, 不能全局性地优化扩展黑启动方案

的恢复效果。

在求得多目标优化问题的 Pareto 最优解集后, 还需要根据决策者的偏好和实际系统的恢复要求选出最满意的 Pareto 非劣解, 这是一个多属性决策过程^[8]。传统的多属性决策方法没有合理融合决策者的偏好因素和决策矩阵的客观信息, 本文引入三角模糊数反映决策者的偏好因素, 并结合信息熵权法确定的客观权重, 采用基于模糊熵权的 Vague 模糊集多属性决策方法进行 Pareto 最优解集排序来确定最终满意解。

为了克服上述研究中的不足, 本文结合多目标优化技术与多属性决策方法对扩展黑启动方案的优化和决策进行讨论。首先综合分析扩展黑启动的初期黑启动阶段和系统后续恢复阶段的相互联系, 从利于后续骨架网络的搭建和后续系统的电压调整的角度, 提取出反映扩展黑启动方案的后续恢复影响的指标并纳入到恢复效果全局优化的目标集。本文以初期阶段内发电量加权和最大化、尽快搭建后续骨架网络和选择运行性能尽可能利于后续系统调整电压的被启动机组为优化目标, 综合考虑各类约束, 进而建立扩展黑启动方案的多目标优化模型; 然后结合快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)与 Dijkstra 法对扩展黑启动方案求解出 Pareto 最优解集; 最后对 Pareto 最优解集进行基于模糊熵权的 Vague 模糊集多属性决策分析, 选取出最满意的扩展黑启动优化方案。

1 考虑后续恢复的扩展黑启动多目标优化模型

1.1 目标函数

因为扩展黑启动方案的初期黑启动阶段和网架

收稿日期: 2013-03-05; 修回日期: 2013-12-03
基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2011003-6110007); 河北省自然科学基金资助项目(E2011502025)
Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20110036110007) and the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2011502025)

重构阶段存在重叠,黑启动阶段与后续恢复进程的联系更加紧密,扩展黑启动方案的优化要根据初期阶段和后续恢复阶段的效果来全局性决策。因此本文从利于后续骨架网络的搭建和后续系统调整电压的角度,提取出反映扩展黑启动方案的后续恢复效果的指标:待恢复机组节点的重要性(拓扑位置的重要性和附近负荷的重要性)和被启动机组的进相运行性能,并将其纳入到决策扩展黑启动方案优劣的目标集,进而综合考虑初期阶段效果和后续恢复效果,建立扩展黑启动方案的多目标优化模型。

a. 待恢复机组节点的重要性。

第1批被黑启动电源启动的机组是初期黑启动阶段和后续网架重构阶段中承上启下的关键,若它们就能在骨架网络层面铺开,则加速了后续网架重构的进展。因此本文采用节点收缩后的网络凝聚度即节点重要度^[9]来定量地表征扩展黑启动方案中被启动机组节点的拓扑位置重要性。

电力系统大停电后恢复的最终目标就是实现全网的负荷恢复,若能首先恢复重要负荷集中的机组节点,则能显著地减少大停电带来的经济和社会损失。因此本文采用与机组节点关联(即与机组节点有路径连接)负荷的停电损失函数^[10]来量化待恢复机组节点附近负荷的重要性。因为负荷停电损失函数为时间的函数,所以初期阶段内的停电损失可采用式(1)所示的拉格朗日插值法对实际系统所统计的停电损失曲线^[9]插值求得。

$$L(t) = L(t_0) \frac{t-t_1}{t_0-t_1} + L(t_1) \frac{t-t_0}{t_1-t_0} \quad (1)$$

其中, $L(t)$ 为根据 t_0 和 t_1 小时的数据插值所得 t 小时的负荷停电损失。例如0.75 h的停电损失可根据0.5 h和1 h数据之间的直线斜率线性插值求得。

综合机组节点的网络拓扑位置的重要性和附近负荷的重要性来评价待恢复机组节点的重要性。为使电源分散在骨架网络和尽快恢复重要负荷,则待恢复机组节点的重要性应该最大化,可表示为如下形式:

$$\min f_1 = -\sum_{i=1}^{n_c} c_i [\mu \alpha_i + L_i(t)] \quad (2)$$

其中, n_c 为电力系统中待启动的机组总数; α_i 为机组节点 i 的节点重要度; $L_i(t)$ 为机组节点 i 附近负荷的停电损失; c_i 表示机组 i 是否在本时段投入,投入 c_i 取1,否则取0; μ 为节点重要度的权重,为加快骨架网络的搭建,需优先恢复节点重要度大的机组,取 $\mu=2$ 。

b. 被启动机组的进相运行性能。

黑启动初期要投运大量空载线路,线路的分布电容会产生大量无功,恢复初期主要靠发电机进相运行(LPO)来吸收无功,因此选择有较好进相运行

能力的机组,可达到吸收系统过剩无功功率的目的,利于调整系统电压。文献[4]也指出扩展黑启动小系统的规模主要受黑启动电源进相运行能力的限制,启动功率不是主要限制因素。因此扩展黑启动方案优化决策中应考虑并量化待启动机组的进相运行能力。

文献[11]分析当同步发电机接外部电抗 x_s (即发电机经变压器和线路与电网相联)时,进相运行的稳定极限为一圆特性,其半径为进相运行的能力极限:

$$\text{LPO}_{\max} = \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_d} \right) \quad (3)$$

其中, LPO_{\max} 为机组进相能力极限, U_G 为发电机机端电压, x_d 为发电机直轴同步电抗。

考虑机组在实际运行过程中,进相能力要比最大容许值 LPO_{\max} 低一些,但不难分析出:①发电机机端电压 U_G 高,则无功储备大,进相能力强;②发电机直轴同步电抗 x_d 和外部电抗 x_s 小,则进相能力强。因此,本文将机组的进相运行能力函数作为表征后续恢复效果的目标函数之一,即:

$$\min f_2 = -\sum_{i=1}^{n_c} c_i \text{LPO}_i = -\sum_{i=1}^{n_c} c_i \left(\frac{1}{x_{is}} + \frac{1}{x_{id}} \right) U_{G_i}^2 \quad (4)$$

其中, LPO_i 为机组 i 的进相运行能力函数。式(4)中发电机 i 的其他参数定义可参照式(2)、(3)。

c. 初期阶段效果——加权发电量最大。

初期阶段效果采用扩展黑启动形成的小系统在优化时间段内加权发电量最大来表征,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3个因素^[4],即:

$$\min f_3 = -\sum_{i=1}^{n_c} \int_{t_{ki}}^{T_1} c_i \gamma(t) P_{G_i}(t) dt \quad (5)$$

其中, T_1 为优化时间; $\gamma(t)$ 为机组出力在不同时段内的权重,随着时间推移, $\gamma(t)$ 的取值逐渐减小; $P_{G_i}(t)$ 为机组 i 在 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,可由图1所示的简化机组出力曲线^[4]求得。

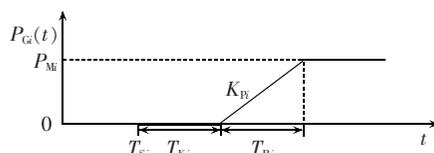


图1 机组出力曲线

Fig.1 Power output curve of generating unit

最后综合考虑扩展黑启动方案的初期阶段和后续恢复效果,建立扩展黑启动方案的多目标优化模型为:

$$\min(F) = \min(f_1, f_2, f_3) \quad (6)$$

1.2 约束集

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

a. 无功约束。

黑启动初期空投线路所产生的充电无功功率可能导致持续工频过电压^[12],因此无功约束为:

$$\sum_{l=1}^{n_L} Q_{Ul} < \sum_{r=1}^{n_B} Q_{Br,max} \quad (7)$$

其中, n_L 为扩展黑启动方案中恢复的路径数; Q_{Ul} 为线路 l 的充电无功功率; n_B 为黑启动电源机组的数量; $Q_{Br,max}$ 为黑启动电源机组 r 能吸收的最大无功功率。

b. 发电机自励磁约束。

工程实际中,发电机自励磁约束为:

$$\sum_{l=1}^{n_L} Q_{Ul} < \sum_{r=1}^{n_B} K_{CB,r} S_{Br} \quad (8)$$

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

c. 潮流约束。

$$\begin{cases} P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} & i=1,2,\dots,n_0 \\ Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} & i=1,2,\dots,n_0 \\ P_l \leq P_{lmax} & l=1,2,\dots,n_L \\ U_i^{min} \leq U_i \leq U_i^{max} & i=1,2,\dots,n_b \end{cases} \quad (9)$$

其中, n_0 为已恢复系统中发电机的总数; P_l 为支路 l 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。

d. 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:

$$P_0(t) + \sum_{i=1}^{n_c} e_i P_{Gi}(t) - \sum_{i=1}^{n_c} P_{cr,i} > 0 \quad (10)$$

其中, $P_0(t)$ 为黑启动电源提供的启动功率,其值随着恢复进程而变化; $\sum_{i=1}^{n_c} e_i P_{Gi}(t)$ 为已并网机组所提供的功率, e_i 表示机组并网状态,已并网取 1, 否则取 0; $P_{cr,i}$ 为机组 i 所需的启动功率。

e. 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:

$$T_{CH,i} > t_0 \quad (11)$$

其中, $T_{CH,i}$ 为机组 i 的最大临界热启动时间。

2 基于 NSGA-II 的扩展黑启动多目标优化

扩展黑启动方案多目标优化问题是一个多约束的多目标优化问题。首先通过机组预选来满足机组的启动时间约束,而无功约束与自励磁约束可合并

为 1 个约束:

$$\begin{cases} Q_b = \min \left(\sum_{r=1}^{n_B} Q_{Br,max}, \sum_{r=1}^{n_B} K_{CB,r} S_{Br} \right) \\ \sum_{l=1}^{n_L} Q_{Ul} < Q_b \end{cases} \quad (12)$$

其他系统运行约束可通过对扩展黑启动方案的潮流计算进行校核,最后扩展黑启动方案的多目标优化问题就转化为由多目标函数和线路充电功率、机组启动功率约束所组成的二维背包问题。

电力系统大停电后的黑启动恢复过程中,各目标同时优化的可能性很小,因为扩展黑启动多目标优化问题同时具有多个目标函数,各目标涉及同一组决策变量并相互制约,所以有必要采用 Pareto 最优解集来协调各目标之间的关系^[13]。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 NSGA-II^[14] 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,所求得的解集分布均匀,有效地避免了求解的目标偏好性,收敛性好。本文将 NSGA-II 应用于扩展黑启动方案的多目标优化中,描述如下,流程图见图 2。

a. 染色体结构设计和初始化种群。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 个备选机组节点,则该恢复方案可表示成长度为 n 的染

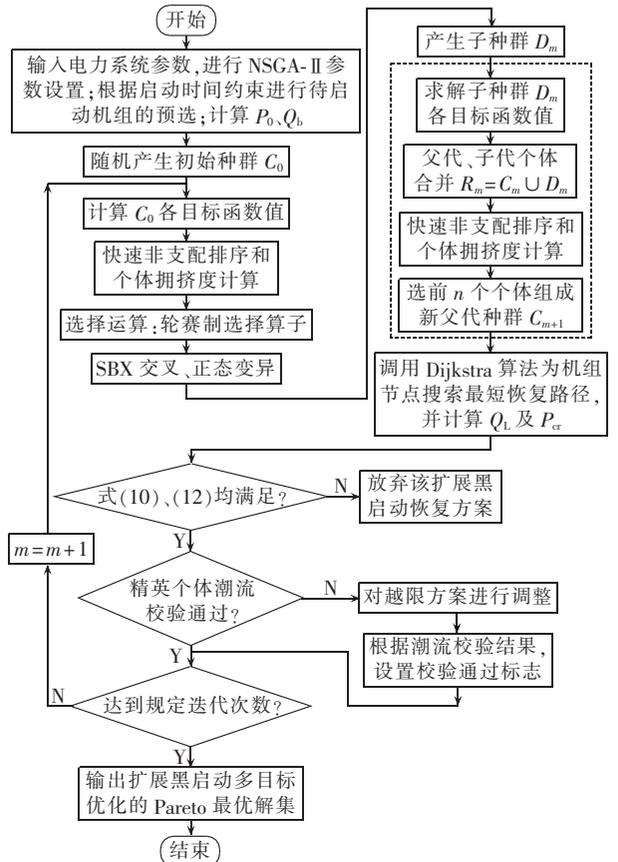


图 2 所提优化方案流程

Fig.2 Flowchart of proposed optimization scheme

色体,若某机组节点被选中,则在状态序列与其对应的位置取 1,否则取 0。随机产生初始种群,计算出各目标函数的适应值。

b. 快速非支配排序^[14],按个体的非劣解水平分层,向 Pareto 最优解的方向进化。设计个体拥挤距离,优先选择拥挤距离较大的个体,保证种群多样性。

c. 选择、交叉和变异运算。选择运算采用轮赛制选择算子,然后采用模拟二进制交叉(SBX)算子和正态变异算子^[13],进行交叉和变异操作,得到子代种群 D_m 。

d. 精英进化策略^[14],即图 2 中虚线方框中所示部分。为防止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直接进入子代,避免陷入局部最优。

e. 精英个体校验模块。首先根据 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,若满足则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^[14],若灵敏度调节量在允许范围内则方案校验通过,否则记作不可行方案。

3 基于模糊熵权的 Vague 模糊集的多属性决策

对于扩展黑启动方案的多目标优化问题,Pareto 最优解集在各目标函数上各有侧重,还需要根据决策者的偏好以及系统恢复的实际要求,从解集中挑选出足够满意的最终解。为合理融合决策者的偏好因素和决策矩阵的客观信息,本文引入三角模糊数反映决策者的偏好因素,并结合信息熵法确定的客观权重,采用基于模糊熵权的 Vague 模糊集多属性决策方法进行 Pareto 最优解集排序来确定最终满意解。

3.1 模糊主观偏好因素

传统基于信息熵的多属性决策方法^[15]没有考虑决策者的偏好因素,而模糊数是一种特殊的模糊集,是表达决策者模糊偏好的重要指标。因此本文采用三角模糊数反映决策者主观上对各属性的重视程度。

三角模糊数 $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$, a_1, a_2, a_3 均为实数,且满足 $a_3 > a_2 > a_1 > 0$,其隶属度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 \leq x < a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & x > a_3 \end{cases} \quad (13)$$

决策者的模糊偏好程度所对应的三角模糊数 (a_1, a_2, a_3) 如表 1 所示。

表 1 模糊偏好程度对应的三角模糊数
Tab.1 Triangular fuzzy numbers corresponding to fuzzy preference degree

偏好程度	(a_1, a_2, a_3)	偏好程度	(a_1, a_2, a_3)
非常低(VL)	(0,0.1,0.3)	高(H)	(0.5,0.7,0.9)
低(L)	(0.1,0.3,0.5)	非常高(VH)	(0.7,0.9,1.0)
中等(M)	(0.3,0.5,0.7)		

设有 N 个决策者,第 j 个决策者赋予第 h 个属性的模糊权重为 $\tilde{w}_h^j = (\tilde{w}_{h1}^j, \tilde{w}_{h2}^j, \tilde{w}_{h3}^j)$,则所有决策者对第 h 个属性的模糊权重为:

$$\tilde{w}_h = \frac{1}{N} (\tilde{w}_h^1 + \tilde{w}_h^2 + \dots + \tilde{w}_h^N) = (\tilde{w}_{h1}, \tilde{w}_{h2}, \tilde{w}_{h3}) \quad (14)$$

$$\tilde{w}_{h1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{w}_{h1}^j, \quad \tilde{w}_{h2} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{w}_{h2}^j, \quad \tilde{w}_{h3} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{w}_{h3}^j$$

将属性的模糊权重转换为最佳非模糊性能值,可以评价方案中性能指标的重要程度,转换公式如下:

$$P_h = \frac{1}{3} (\tilde{w}_{h1} + \tilde{w}_{h2} + \tilde{w}_{h3}) \quad (15)$$

归一化处理后求得第 h 个属性的模糊权重为:

$$w_{h1} = \frac{P_h}{\sum_{h=1}^M P_h} \quad (16)$$

3.2 信息熵权法

信息熵权法^[15]借助信息熵来描述系统内在信息的客观性,是根据决策矩阵中信息的差异度来客观上确定属性的权重。由 Pareto 最优解集构成的决策矩阵来确定客观权重,计算步骤如下。

首先构造有 K 个方案 M 个属性的决策矩阵 $B = (b_{kh})_{K \times M}$,将决策矩阵归一化处理为优属度矩阵 $G = (g_{kh})_{K \times M}$;然后计算第 h 个属性的熵值 H_h :

$$q_{kh} = g_{kh} / \sum_{k=1}^K g_{kh} \quad (17)$$

$$H_h = -\frac{1}{\ln K} \sum_{k=1}^K q_{kh} \ln q_{kh} \quad (18)$$

将第 h 个属性的熵权 w_h 作客观权重:

$$w_h = \frac{1 - H_h}{\sum_{h=1}^M (1 - H_h)} \quad (19)$$

3.3 模糊熵权法

模糊熵权法^[16]合理地融合了模糊主观偏好因素和客观信息熵权,这既利用了决策者的经验,也尽可能地避免了选取满意解的主观盲目性。

假定模糊权重为 $\mathbf{W}_f = (w_{f1}, w_{f2}, \dots, w_{fm}, \dots, w_{fM})$,信息熵权法确定的权重 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_h, \dots, w_M)$,由加权几何平均数方法计算第 h 个属性的模糊熵权为:

$$z_h = \eta \frac{w_h w_h}{\sum_{h=1}^M w_h w_h} \quad (20)$$

其中, z_h 为第 h 个属性的模糊熵权,且 $\sum_{h=1}^M z_h = 1$ 。当决策者对实际恢复情况不确定时,可增大信息熵客观权重的比重 η ,利用信息熵权法所反映的 Pareto 最优解集的内部客观信息来指导决策。

3.4 Vague 模糊集多目标决策方法

Vague 模糊集^[17]作为 Fuzzy 集的一种推广,可同时兼顾隶属与非隶属两方面的信息,因此能更全面地表达扩展黑启动方案多目标决策中的模糊信息。

Vague 集的定义为:设论域 U ,元素 x 是论域 U 中的任一元素,论域 U 上的一个 Vague 集 V 可由真隶属度函数 $t_V(x)$ 和假隶属度函数 $d_V(x)$ 表示。其中 $t_V(x)$ 是从支持 x 的证据中导出的肯定隶属度的下界, $d_V(x)$ 是从反对 x 的证据中导出的否定隶属度的下界,并满足 $t_V(x):U \rightarrow [0,1], d_V(x):U \rightarrow [0,1], t_V(x) + d_V(x) \leq 1$ 。Vague 模糊集多目标决策步骤如下。

a. 构造决策矩阵 B ,按照效益型指标形式对 Pareto 解集构成的决策矩阵进行归一化处理,得到相对优属度矩阵 G 。

$$g_{kh} = \frac{b_{kh}}{\sqrt{\sum_{k=1}^K b_{kh}^2}} \quad (21)$$

b. 确定正、负理想方案优属度向量 G^+, G^- ,进而计算方案集综合 Vague 值矩阵 $V = ([t_{kh}, d_{kh}])_{K \times M}$ 。

由各方案的最大优属度值 $g_h^+ = \max(g_{kh})$ 和最小优属度值 $g_h^- = \min(g_{kh})$,其中 $k = 1, 2, \dots, K$,建立正、负理想方案:

$$\begin{cases} G^+ = (g_1^+, g_2^+, \dots, g_M^+) \\ G^- = (g_1^-, g_2^-, \dots, g_M^-) \end{cases} \quad (22)$$

g_{kh} 相对于正理想方案指标 g_h^+ 和负理想方案指标 g_h^- 的真假隶属度为:

$$\begin{cases} t_{kh}^+ = \frac{g_{kh} - g_h^-}{g_h^+ - g_h^-}, & t_{kh}^- = \frac{g_h^+ - g_{kh}}{g_h^+ - g_h^-} \\ d_{kh}^+ = 1 - t_{kh}^+ = \frac{g_h^+ - g_{kh}}{g_h^+ - g_h^-}, & d_{kh}^- = 1 - t_{kh}^- = \frac{g_{kh} - g_h^-}{g_h^+ - g_h^-} \end{cases} \quad (23)$$

综合 Vague 隶属度为:

$$\begin{cases} t_{kh} = t_{kh}^+ d_{kh}^- = \left(\frac{g_{kh} - g_h^-}{g_h^+ - g_h^-} \right)^2 \\ d_{kh} = d_{kh}^+ t_{kh}^- = \left(\frac{g_h^+ - g_{kh}}{g_h^+ - g_h^-} \right)^2 \end{cases} \quad (24)$$

c. 结合模糊熵权 z_h ,确定 Pareto 解集中各方案相对理想方案的综合 Vague 值 $V_k = [t_k, d_k], k = 1, 2, \dots, K$ 。

$$\begin{aligned} t_k &= \sum_{h=1}^M z_h t_{kh} = \sum_{h=1}^M z_h \left(\frac{g_{kh} - g_h^-}{g_h^+ - g_h^-} \right)^2 \\ d_k &= \sum_{h=1}^M z_h d_{kh} = \sum_{h=1}^M z_h \left(\frac{g_h^+ - g_{kh}}{g_h^+ - g_h^-} \right)^2 \end{aligned} \quad (25)$$

d. 根据评分函数值进行排序,选出最优方案。

可通过如下评分函数计算得到方案 k 相对于理想方案的适应程度。

$$\begin{cases} S_1 = t_k - d_k \\ S_2 = 1 - d_k \end{cases} \quad (26)$$

对备选方案排序时,首先根据各方案的 S_1 评分函数值,值越大表示方案 k 越优;若 S_1 相同时,再根据 S_2 评分函数值,值越大则方案越优。

4 算例与结果分析

4.1 算例求解

为验证考虑后续恢复影响的扩展黑启动多目标优化方法的有效性,本文采用图 3 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研究。

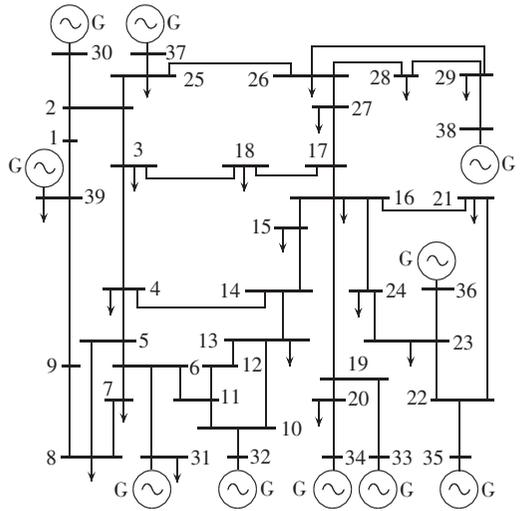


图 3 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig.3 New England 10-unit 39-bus power system

设 30 号节点为大型抽水蓄能电厂,将其作为系统的黑启动电源,其参数为:装机容量 3×250 MW, $\cos \varphi = 0.9, K_{CB} = 1.25$,机组空载时所吸收的最大无功功率为 $0.35S_N$ 。假设 31 号节点上的机组有冷启动时限,其余机组的最大临界热启动时间为 1 h。各待启动机组的其他参数假设以及节点参数计算值如表 2 所示,其中 U_G 为发电机机端电压标么值, K_C 为发电机的短路比, α 为归一化处理后的机组节点的节点重要度计算值。优化时间段 $T_1 = 4$ h,发电量权重系数 $\gamma(t)$ 在 $[0, 1]$ h 取 1.5,在 $(1, 2]$ h 取 1.0,在 $(2, 4]$ h 取 0.8,并且节点重要度的权重 μ 取 2。

扩展黑启动恢复过程中,通过机组预选,由于 31 号节点的机组有冷启动时限,在优化时间段内有 8 个备选待启动机组节点。假设 30 号节点黑启动电源中的 1 台机组完全供给厂用电,剩余 2 台机组作为提供初始启动功率的黑启动机组,从而计算出系统的初始启动功率 $P_0 = 320$ MW,黑启动电源进相运行所

表 2 待启动机组的参数设置

Tab.2 Parameters of units to be restored

节点	P_c /MW	P_a /MW	K_p /(MW·h ⁻¹)	U_c	K_c	α
31	600	30.0	200	0.951	0.58	0.96
32	250	12.5	160	0.949	0.65	0.96
33	200	10.0	108	0.997	0.63	0.95
34	300	15.0	100	1.012	0.47	0.96
35	250	12.5	180	1.049	0.45	0.96
36	330	16.5	150	1.064	0.59	0.96
37	320	16.0	120	1.028	0.53	0.95
38	300	15.0	200	1.027	0.51	0.96
39	200	10.0	120	1.031	0.67	1.00

吸收的无功功率 $Q_b=155.56$ Mvar。

本文利用 NSGA-II 对扩展黑启动方案进行优化求解,其参数设置如下:交叉概率取 0.9,变异率取 0.1,种群大小取 100,最大迭代次数为 100。图 4 显示了扩展黑启动方案中满足约束集和经过精英校验的 Pareto 非支配解空间。

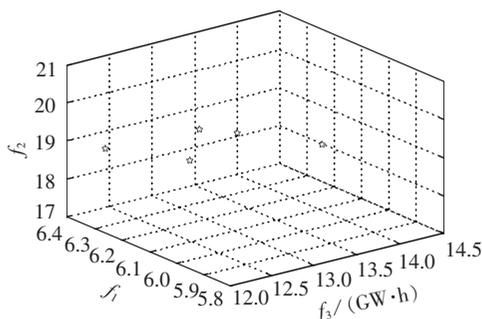


图 4 Pareto 解空间的分布情况

Fig.4 Spacial distribution of Pareto solutions

在追求发电量最大化的同时,还应将待启动机组分散至骨架网络上和启动进相性能好的机组,以保证全局性的恢复效果最优。由 3 位专家根据自身经验赋予 3 个属性模糊权重,归一化得模糊主观偏好权重向量为 $[0.485\ 8, 0.304\ 7, 0.209\ 5]^T$ 。按照效益型指标对 Pareto 最优解集构成的决策矩阵进行归一化处理,根据信息熵权法计算的客观权重向量为 $[0.317\ 0, 0.342\ 6, 0.340\ 4]^T$ 。由模糊熵权法融合主客观权重,模糊熵权向量为 $[0.467\ 1, 0.316\ 6, 0.216\ 3]^T$ 。利用式(24)求出每个属性相对理想方案的综合 Vague 值矩阵,再结合模糊熵权向量,根据评分函数式(25)对 Pareto 最优解集中各方案评分如表 3 所示。

4.2 结果分析

从上述算例可以看出,综合考虑初期阶段效果和后续恢复效果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,采用 NSGA-II 优化得到的扩展黑启动问题的 Pareto 最优解集中含有多个最优解(如图 4 所示),在目标空间上分布均匀,彼此间互不支配,为决策者提供了更全

表 3 多目标优化方案评分结果

Tab.3 Evaluation scores of multi-objective optimization schemes

方案	恢复机组节点	f_1	f_2	f_3 /(GW·h)	Vague 评分
1	33,36,37	6.131	18.535	1.412 602	(0.629,0.931)
2	32,33,37	6.393	17.911	1.342 668	(0.652,0.948)
3	32,36,39	6.153	19.632	1.276 365	(0.473,0.921)
4	32,33,39	6.258	19.223	1.200 327	(0.182,0.674)
5	33,36,39	5.994	20.047	1.270 260	(0.245,0.781)

局性的选择空间。从图 4 中还可以看出,由于这 3 个目标函数的相互制约,使各目标同时最优化的可能性很小,因此只能根据恢复的实际要求和决策者的偏好信息从 Pareto 最优解集中选出最终满意的扩展黑启动恢复方案。对比表 3 评分值可知,方案 2 为最优的扩展黑启动方案:G₃₀-G₃₇-G₃₃-G₃₂。该方案同时兼顾了初期阶段效果和后续恢复效果的优化,方案中 3 个属性均有较大的目标函数值,不仅能为系统提供较大的发电量,同时兼顾了搭建骨架网络加快后续网架重构的进展,并且优先恢复重要负荷集中的机组节点以及有较好进相运行能力的机组,以便于后续的系统电压调整,从而更利于加快系统恢复的整体进程。可见,比单一目标的扩展黑启动方案优化具有更大的实际应用价值。本文采用的基于模糊熵权的 Vague 模糊集多属性决策,利用了决策者的经验信息,且在决策者对实际恢复情况不确定时,可利用信息熵权法所反映的 Pareto 最优解集的内部客观信息进行决策,尽可能地避免了选取满意解的主观盲目性。

扩展黑启动小系统的规模主要受线路的充电功率约束所限制,机组启动功率约束不是主要限制因素。如本文方法得到的最优方案 2 中,恢复 G₃₇、G₃₃ 和 G₃₂ 路径上产生的总容性无功功率为 142.15 Mvar,小于 Q_b ;而恢复所需的总启动功率为 38.5 MW,远小于 P_0 。优先恢复进相运行能力良好的机组节点,更利于吸收线路上的充电功率,保证黑启动小系统的稳定运行。在参照扩展黑启动优化方案进行实际电网的恢复中,还应按照发电厂安全规程来保留适当的机组进相运行裕度,以保障恢复的安全性。

5 结论

本文提出结合多目标优化技术与多属性决策方法对扩展黑启动方案进行多目标优化和决策。该方法兼顾 3 个扩展黑启动的恢复目标——初期阶段内发电量加权和最大化、尽快搭建后续骨架网络和选择运行性能尽可能利于后续系统调整电压的机组,并且综合考虑系统运行约束和机组启动约束。通

过建立扩展黑启动方案的多目标优化模型,结合 NSGA-II 与 Dijkstra 法对扩展黑启动方案决策问题进行求解,得出其 Pareto 最优解集。本文引入三角模糊数反映决策者的偏好因素,并结合信息熵法确定的客观权重,采用基于模糊熵权的 Vague 模糊集多目标决策方法进行 Pareto 最优解集排序,确定最终满意解。优化得到的扩展黑启动方案在满足各类约束前提下,不仅能为系统提供较大的发电量,同时兼顾了搭建骨架网络利于后续网架重构的进展,并且可优先恢复较好进相运行能力的机组,有利于后续的系统电压调整,进而加快系统恢复的整体进程。

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] 严奉军,王宁. 电厂黑启动方案及其系统试验[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(2):122-125.
YAN Fengjun, WANG Ning. Power plant black-start scheme and its experiment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2):122-125.
- [3] 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.
- [4] 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 Xueping, ZHONG Huirong, JIA Jinghua, et al. Extended black-start schemes of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28):25-32.
- [5] FUNAKOSHI T, FURUKAWA K. Transformer over voltage problems and countermeasures at black start[C]//Proceedings of IEEE PES General Meeting. Toronto, Canada: IEEE Power Engineering Society, 2003:581-588.
- [6] 孟宪朋,么莉,林济铿. 天津电网黑启动方案[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2):108-112.
MENG Xianpeng, YAO Li, LIN Jikeng. Black startup schemes for Tianjin Power Grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2):108-112.
- [7] 刘艳,顾雪平,张丹. 基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5):32-37.
LIU Yan, GU Xueping, ZHANG Dan. Data envelopment analysis based relative effectiveness assessment of power system black-start plans[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5):32-37.
- [8] 曾顺奇,林振智,文福控,等. 基于 Vague 集理论的启动决策模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2):18-22.
ZENG Shunqi, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. A Vague set theory based model and approach for black-start decision-making [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2):18-22.
- [9] 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.
- [10] 刘连志,顾雪平,刘艳. 不同黑启动方案下电网重构效率的评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5):24-28.
LIU Lianzhi, GU Xueping, LIU Yan. Investigation on the efficiencies of power system reconfiguration with different black start schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5):24-28.
- [11] 熊信银. 发电厂电气部分[M]. 3 版. 北京:中国电力出版社, 2004:285-289.
- [12] 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.
- [13] 王洪涛,刘玉田. 基于 NSGA-II 的多目标输电网架最优重构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23):14-18.
WANG Hongtao, LIU Yutian. Multi-objective optimization of power system reconstruction based on NSGA-II [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23):14-18.
- [14] 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(1):1-7.
ZHU Dongxue, GU Xueping, ZHONG Huirong. A multi-objective optimization method for post-blackout unit restoration[J]. Power System Technology, 2013, 37(1):1-7.
- [15] 余胜春. 基于信息熵的多属性参数系统决策方法[J]. 数学杂志, 2012, 32(6):1111-1114.
YU Shengchun. Decision method of multi-attribute system based on information entropy[J]. Journal of Mathematics, 2012, 32(6):1111-1114.
- [16] 廖炎平,刘莉,龙腾. 基于多属性决策的气动隐身多目标优化[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13):121-130.
LIAO Yanping, LIU Li, LONG Teng. Multi-objective aerodynamic and stealthy performance optimization based on multi-attribute decision making[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13):121-130.
- [17] de KUMAR S, BISWAS R, RANJAN R A. Some operations on intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 114(3):477-484.

作者简介:



陈 亮

陈 亮(1989-),男,山东济南人,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:786377469@qq.com);

顾雪平(1964-),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,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,河北石家庄人,高级工程师,主要研究方向为电网调度运行和控制。

(下转第 150 页 continued on page 150)

- [25] YIHSU C,WANG Lizhi. A power market model with renewable portfolio standards,green pricing and GHG emissions trading programs[C]//Proceedings of the Energy 2030 Conference. Atlanta, GA, USA;IEEE,2008:1-7.
- [26] EFTICHIOS S S. Tradeable emission permits regulations in the presence of imperfectly competitive product markets:welfare implications [J]. Environmental and Resource Economics,1997 (9):65-81.
- [27] LIND A,ROSENBERG E,SELJOM P,et al. Analysis of the EU renewable energy directive by a techno-economic optimisation model[J]. Energy Policy,2013(60):364-377.

作者简介:



钟宇峰

钟宇峰(1989-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与电力市场、分布式发电与储能(E-mail:yufengzhongee@gmail.com);

黄民翔(1955-),男,浙江杭州人,教授,主要研究方向为电网规划与电力市场;

文福拴(1965-),男,河南林州人,特聘教授,博士研究生导师,主要从事电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车等方面的研究工作(E-mail:fushuan.wen@gmail.com)。

Equilibrium analysis of direct electricity purchase with green certificate mechanism

ZHONG Yufeng,HUANG Minxiang,WEN Fushuan,GONG Jianbo,WANG Yan

(College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A math model of oligopolistic market with direct electricity purchase is established and analyzed, which classifies the electricity producers as the price-leader, price-follower and price-recipient, considers the bilateral contracts and introduces the green certificate system to it. With an electric power market including five power generation corporations as an example, the influence of the bilateral contract amount, green certificate price and green power fluctuation on the market equilibrium is analyzed. The conclusions of analysis are: along with the increase of bilateral contract amount, the total power generation of power generation corporations increases while their total profit, as well as the electricity price, reduces; the green certificate price should be kept stable to avoid the serious fluctuation of electricity market and promote the development of renewable energy.

Key words: electricity market; transaction; green certificate; renewable energy; direct electricity purchase; oligopoly model; equilibrium analysis

(上接第 143 页 continued from page 143)

Multi-objective optimization and decision making of extended black-start scheme considering subsequent restoration influence

CHEN Liang¹, GU Xueping¹, JIA Jinghua²

(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: With the comprehensive consideration of initial and subsequent restoration stages, a multi-objective optimization model is built for the extended black-start schemes, which, with the constraints of unit startup and system operation, has three optimization objectives: maximize the weighted power generation during the initial stage, establish the system frame as soon as possible and select the black-start units beneficial to the subsequent regulation of system voltage. NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) and Dijkstra algorithm are applied to solve the model and obtain Pareto solutions, from which the best extended black-start scheme is selected by applying the Vague-set multi-attributes decision-making based on fuzzy entropy weight and combining the subjective preference of decision-maker with the objective information of decision matrix. The effectiveness of the proposed method is validated by the case study of New England 10-unit 39-bus power system.

Key words: electric power systems; black-start; system restoration; optimization; constraint; decision making; Vague sets; fuzzy entropy; models