

改进捕鱼算法及其在机组组合优化问题中的应用

合理安排机组组合方案是当前电力系统研究中的热点，根据机组优化组合问题的非线性特性，以降低机组发电成本为目标，提出一种改进捕鱼算法的机组组合优化算法。首先针对标准捕鱼算法易陷入局部最优的缺点，引入渔夫的认知能力判断鱼浓度的区域，提高其搜索效率和准确度；然后建立机组组合的目标函数，并采用改进捕鱼算法搜索目标函数的最优解，从而得到最优的机组组合方案；最后采用仿真实验测试其正确性。实验结果表明，改进捕鱼优化算法可以获得较理想的机组组合方案，降低了机组的发电成本，提高了总能源利用率，为机组组合优化问题提供了一种较好的解决途径。

库波/武汉软件工程职业学院



库波/副教授

关键词/Keywords

机组组合·
捕鱼算法·
认知能力·
优化算法·
最优方案·

近年来，随着我国经济不断增长，电网峰谷值之间的差异日益变大，需要对机组负荷进行动态、自适应调整，以满足实际应用的需求^[1]。在一定目标条件下，根据各机组状态和性能的实际情况，对机组的起停进行合理安排，使电力系统的运行成本最低，以获得最大的经济效益，这就是机组组合优化问题^[2]。

机组组合问题是一种高维、非线性的优化难题，一直是人们广泛关注的焦点，针对机组组合优化问题，人们展开了深入的研究，提出了许多行之有效的机组组合优化问题求解算法^[3]。主要分为两类：确定性算法和随机优化算法。确定性算法主要包括动态规划法、优先顺序法^[4-5]，对于小规模机组组合优化问题，确定性算法可以较快地找到最优方案，但是随着机组数的增加，其计算量也急剧增加，因此通常情况下需对问题

进行简化，从而影响机组组合优化问题求解准确度，应用范围受到一定的限制^[6]。随机优化算法属于人工智能优化算法，具有简单、鲁棒性强等优点，比较适合于大规模机组组合优化问题的求解，已经出现了基于粒子群算法、遗传算法的机组组合优化算法，并取得了一些成果^[7-9]。但机组组合优化问题规模越大，求解难度越大，这些随机优化算法有时难以找到机组组合优化问题的最优解^[10]。

捕鱼算法是一种模拟渔夫捕鱼行为的随机优化算法，具有设置参数少、易编码等优点^[11]，为机组组合优化问题的求解提供了一种新的研究方法，但是标准捕鱼算法存在一些不足，为此，为了获得更理想的机组组合优化方案，本文对标准捕鱼算法进行改进，并应用于机组组合优化问题的求解，具体应用实例结果表明，改进捕鱼优化算法更加适用于大规模的机组组合问题的求解。

改进捕鱼算法

1. 标准捕鱼算法

在标准捕鱼算法中，通过模拟渔夫捕鱼习惯进行问题最优解的搜索，设共有 n 个渔夫，第 i 个渔夫在 t 时刻的位置如式(1)所示，其代表问题的候选解，即

$$X^{(i)} = [x_1^{(i)}(t), x_2^{(i)}(t), \dots, x_n^{(i)}(t)] \quad (1)$$

第 i 个渔夫在其位置周围撒网，那么下鱼网的点集为

$$\begin{aligned}\Omega(X^{(i)}(t)) &= \{X^{(i)}(t+1)\} \\ &= [x_1^{(i)}(t), x_2^{(i)}(t), \dots, x_n^{(i)}(t)] \\ &\in \{x_j^{(i)}(t) - l^{(-)}, x_j^{(i)}(t), x_j^{(i)}(t) + l^{(+)}\} \\ j &= 1, 2, \dots, n\end{aligned}\quad (2)$$

设 $f(X)$ 为鱼的密度度量函数, 如果 $f(X^{(i)}(t+1)) = \max_{X^{(i)}(t+1) \in \Omega(X^{(i)}(t+1))} f(X^{(i)}(t+1)) > f(X^{(i)}(t))$, 那么第 i 个渔夫移到 $X^{(i)}(t+1)$, 并继续进行寻优, 不断找到比当前位置更优的位置, 即移动搜索。

如果 $f(X^{(i)}(t+1)) = \max_{X^{(i)}(t+1) \in \Omega(X^{(i)}(t+1))} f(X^{(i)}(t+1)) \leq f(X^{(i)}(t))$, 那么第 i 个渔夫的位置不变, 并记为 $X^{(i)}(t+1) = X^{(i)}(t)$, 继续在 $X^{(i)}(t)$ 处撒网, 得到下网点集如式(3)所示, 不断找到比当前位置更优的位置, 称之为收缩搜索。

$$\begin{aligned}\Omega(X^{(i)}(t+1)) &= \{X^{(i)}(t+2)\} \\ &= [x_1^{(i)}(t+2), \dots, x_n^{(i)}(t+2)]X_j^{(i)}(t+2) \\ &\in \{x_j^{(i)}(t+1) - \alpha l^{(-)}, x_j^{(i)}(t+1), x_j^{(i)}(t+1) + \alpha l^{(+)}\} \\ j &= 1, 2, \dots, n\end{aligned}\quad (3)$$

式中, α 为收缩因子。

公告板保存最优渔夫个体状态, 每个渔夫都与公告板中的记录进行比较, 如果优于公告板中的最优渔夫个体状态, 那么用自身状态更新公告板中的最优渔夫个体状态。

如果某渔夫在某点处进行收缩搜索次数超过预先设置的最大阈值, 但其状态还是没有发生改变, 那么该渔夫在打鱼作业区中重新随机选点。

2. 捕鱼算法的改进

与其他随机优化算法相似, 标准捕鱼算法也存在一些不足, 为此本文对其进行相应的改进, 改进基本思想为: 通过引入渔夫的自身感知能力和捕鱼经验, 推测哪个区域鱼的浓度高, 并逐渐向该区域靠近, 加快问题求解的速度和准确度。设 t 时刻的全局最优位置和最优点分别为 $G(t) = (g_1(t), g_2(t), \dots, g_n(t))$ 和 $B^i(t) = (b_1^i(t), b_2^i(t), \dots, b_n^i(t))$, 此时的第 i 个渔夫位置为 $X^{(i)} = [x_1^{(i)}(t), x_2^{(i)}(t), \dots, x_n^{(i)}(t)]$, 如果 $X^{(i)} \neq G(t)$, 那么该渔夫选取 N 个探测点的策略具体如下

$$P_j^i(t+1) = X^{(i)}(t) + r_j l [\beta_j \frac{Q^j(t+1)}{\|Q^j(t+1)\|} +$$

$$(1 - \beta_j) \frac{G(t) - X^{(i)}(t)}{\|G(t) - X^{(i)}(t)\|}] \quad (4)$$

式中, $j = 1, 2, \dots, N$; l 为撒网半径^[12]。

如果 $X^{(i)} = G(t)$, 那么该渔夫选取 N 个探测点的策略具体如下

$$P_j^i(t+2) = X^{(i)}(t+1) + r_j l \frac{Q^j(t+2)}{\|Q^j(t+2)\|} \quad (5)$$

设 $P_{\text{best}}^i(t+1) = \text{best}\{P_j^i(t+1): 1 \leq j \leq N\}$, 若 $P_{\text{best}}^i(t+1)$ 比 $X^{(i)}(t)$ 好, 则第 i 个渔夫将移到 $P_{\text{best}}^i(t+1)$, 而且 $X^{(i)}(t+1) = P_{\text{best}}^i(t+1)$ 。

如果 $P_{\text{best}}^i(t+1)$ 不优于 $X^{(i)}(t)$, 那第 i 个渔夫的下一步捕鱼行为方式为在 $X^{(i)}(t) = G(t)$ 的条件下, 第 i 个渔夫的位置保持不变, 否则第 i 个渔夫的位置更新方式为

$$\begin{aligned}x_j^i(t+1) &= X_j^i(t) + r[b_j^i(t) - x_j^i(t)] + \\ r_2 \exp &\left\{ -\frac{g_j(t) - x_j^i(t)}{\|g_j(t) - x_j^i(t)\|} [g_j(t) - x_j^i(t)] \right\}\end{aligned}\quad (6)$$

改进捕鱼算法的机组组合问题求解

1. 机组组合问题的数学模型

机组组合优化是指在一定约束条件下和周期内, 对机组的起停进行合理安排, 使机组发电成本尽可能变少, 因此机组组合优化的数学模型定义如下

$$\min_{u_{it}, P_{it}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_{it} F_i(P_{it}) + u_{it} (1 - u_{i(t-1)}) S_i] \quad (7)$$

式中, N 为机组数; T 为总时段数; $F_i(P_{it})$ 和 S_i 分别为机组 i 的发电耗量和启动耗量^[13]。

$F_i(P_{it})$ 和 S_i 分别定义如下

$$F_i(P_{it}) = a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i \quad (8)$$

$$S_i = S_{0,i} + S_{1,i} (1 - e^{-T_{it}^{\text{off}} / \tau_i}) \quad (9)$$

式中, a_i 、 b_i 和 τ_i 为机组 i 发电的运行特性参数; T_{it}^{off} 为机组 i 在时段 t 的已停机时间。

机组组合问题需要满足一定的约束条件, 具体如下:

(1) 负荷平衡约束为

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{it} = P_{Dt} \quad (10)$$

式中, P_{Dt} 为系统负荷。

(2) 机组出力约束

$$P_{i\min} \leq P_{it} \leq P_{i\max} \quad (11)$$

式中, $P_{i\min}$ 、 $P_{i\max}$ 分别为机组的出力最小值和最大值^[14]。

(3) 旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{i\max} \geq P_{Dt} + P_{Rt} \quad (12)$$

式中, P_{Rt} 为系统负荷。

(4) 最小停机时间约束

$$\begin{cases} T_{it}^{\text{on}} \geq T_{i\min}^{\text{on}} \\ T_{it}^{\text{off}} \geq T_{i\min}^{\text{off}} \end{cases} \quad (13)$$

(5) 机组加减出力速率约束

$$-P_{iD} \leq P_{it} - P_{it-1} \leq P_{iU} \quad (14)$$

2. 改进捕鱼算法的机组组合问题求解步骤

改进捕鱼算法的机组组合问题求解的具体步骤如下:

- 1) 对机组组合问题进行分析, 并设定相应的目标函数。
- 2) 设置改进捕鱼算法的参数, 如渔夫数、最大迭代次数以及探测点个数。
- 3) 初始化渔夫群, 每一个渔夫的位置即为机组组合问题的候选解。
- 4) 计算渔夫所在位置鱼的浓度, 并对其进行排序, 将最优渔夫所在位置记录到公告板中。
- 5) 根据式(5)选择 N 个探测点, 如果 $P_{\text{best}}^i(t+1) > X^i(t)$, 那么 $X^i(t+1) = P_{\text{best}}^i(t+1)$; 否则, $X^i(t+1) = G(t)$, 并更新 $B(t+1)$ 。
- 6) 根据式(4)选择 N 个探测点, 如果 $P_{\text{best}}^i(t+1) > X^i(t)$, 那么 $X^i(t+1) = P_{\text{best}}^i(t+1)$; 否则根据式(6)进行移动, 并更新 $B^i(t+1)$ 。
- 7) 将最优渔夫的位置 $G(t+1)$ 保存到公告板中。
- 8) 迭代次数增加。
- 9) 如果达到最大迭代次数, 则输出最优渔夫的位置, 即找到机组组合问题的最优解, 否则返回步骤4) 继续执行。

仿真实验

1. 仿真平台

为了测试改进捕鱼算法的机组组合优化问题

求解有效性, 采用10台机组系统作为仿真对象进行验证性实验, 并选择文献[15]的机组组合优化算法进行对照实验。仿真平台为Intel 双核2.4 GHz CPU、4 GB DDR 内存、500 GB 硬盘及Windows 8 操作系统, 采用VC++ 6.0语言进行编程。

2. 实验结果与分析

(1) 发电成本比较

对于10台机组的优化问题, 改进捕鱼算法和文献[15]算法的24 h发电成本仿真结果如图1所示。由图1可知, 相对于文献[15]的机组组合优化算法, 改进捕鱼算法的发电成本明显降低, 有效提高了发电系统的经济效益, 这主要是由于改进捕鱼算法可以获得更优的机组组合优化方案, 可以合理地安排机组起停。

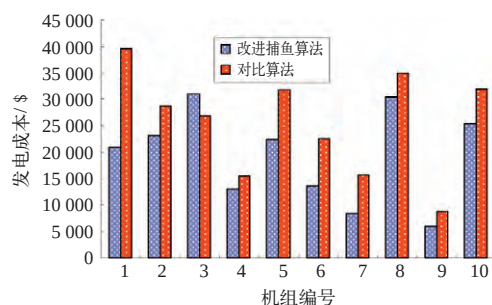


图1 改进捕鱼算法与对比算法的发电成本比较

(2) 能源利用率比较

改进捕鱼算法和文献[15]算法中24 h的总能源利用率仿真对比结果如图2所示。由图2可知, 相对于文献[15]的机组组合优化算法, 改进捕鱼算法的总能源利用率得到了大幅度提高, 可以减少发电成本, 具有显著的经济效益。

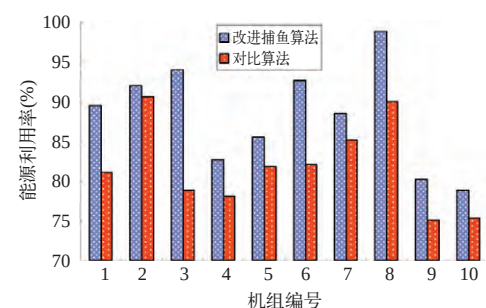


图2 改进捕鱼算法与对比算法的能源利用率比较

(3) 算法求解的效率比较

改进捕鱼算法和文献[15]算法对10台机组的优化问题平均求解时间如图3所示。从图3可以看

出, 相对于文献[15]的机组组合优化算法, 改进捕鱼算法的平均求解时间相对较少, 求解速度得以加快, 提高了机组组合优化问题求解的效率, 更加适合于解决大规模的机组组合优化问题。

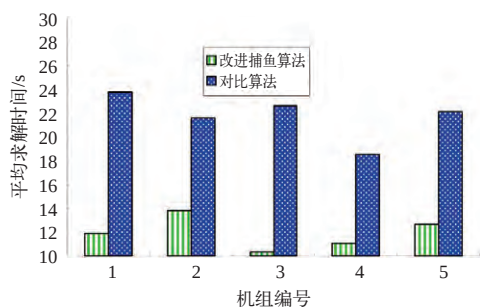


图3 改进捕鱼算法与对比算法的求解效率比较

结束语

为了获得更加理想的机组组合优化方案, 提高电力系统的经济效益, 针对标准捕鱼优化算法存在的缺陷, 提出了一种改进捕鱼算法的机组组合优化算法, 并通过仿真实验测试检验算法的正确性。可以得到以下结论: 改进捕鱼算法能够克服当前机组组合优化算法的不足, 降低了机组的发电成本, 提高了总能源利用率, 相对于对比算法, 具有一定的优势, 可以满足实际应用的要求。

参考文献

- [1] Tuohy A, Meibom P, Denny E, et al. Unit commitment for systems with significant wind penetration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24 (2): 592-601.
- [2] Methaprayoon K, Lee W J, Yingvivanapong C, et al. An integration of ANN wind power estimation into UC considering the forecasting uncertainty [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2007, 43 (6): 1441-1448.
- [3] 王承民, 郭志忠, 于尔铿. 确定机组组合的一种改进的动态规划方法 [J]. 电网技术, 2001, 25 (5): 20-24.
- [4] 曲朝阳, 于华涛, 朱莉, 等. 电力系统机组组合问题的进制组合算法 [J]. 电测与仪表, 2013, 50 (12): 60-64.
- [5] 黎静华, 兰飞. 适合于机组组合问题的扩展优先顺序法 [J]. 电网技术, 2010, 38 (2): 1-7.
- [6] 何小宇, 张粒子, 谢国辉. 改进的拉格朗日松弛法求解机组组合问题 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (17): 16-21.
- [7] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 28-32.
- [8] 江岳文, 陈冲, 温步瀛. 含风电场的电力系统机组组合问题随机模拟粒子群算法 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (6): 129-13.
- [9] 范宏, 韦化. 改进遗传算法及其在机组优化组合中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16 (4): 46-49, 6.
- [10] 陈海良, 郭瑞鹏. 基于改进离散粒子群算法的电力系统机组组合问题 [J]. 电网技术, 2011, 35 (12): 94-99.
- [11] 蒋秀洁, 吴永华, 杨敏. 基于PSO-GA算法的电力系统机组组合研究 [J]. 继电器, 2006, 34 (5): 34-38.
- [12] Jiang Xiujie, Wu Yonghua, Yang Min. PSO-GA algorithms for unit commitment of power system [J]. Relay, 2006, 34 (5): 34-38.
- [13] 王勇, 陈建荣, 庞兴. 一种模拟渔夫捕鱼的寻优算法 [J]. 计算机应用研究, 2008, 26 (8): 2888-2890.
- [14] 王勇, 庞兴. 一种采用动态策略的模拟捕鱼优化方法 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2010, 40 (3): 19-25.
- [15] 张炯, 刘天琪, 苏鹏, 等. 基于遗传粒子群混合算法的机组组合优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (9): 25-30.

(收稿日期: 2015-03-08) EA