

基于自适应差分进化算法的经济负荷调度方法研究

刘明明¹, 王 谦¹, 赵宜馨², 李伟强²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 北京清大科越股份有限公司, 北京 100084)

摘要: 发电系统的经济调度对发电成本影响深刻, 旨在通过利用基于外部存档的自适应差分进化算法来解决此问题。在经济负荷调度问题中, 有功功率、无功功率、电压幅值和相角等多个变量决定了经济调度成本, 是一个非线性优化问题, 需要通过调整相关参数以获得最低的发电成本。采用自适应差分进化求解经济调度优化问题, 该算法使用 IEEE 30 节点系统进行试验, 通过自适应差分进化算法综合分析外部历史数据, 引入相关外部参数来调节内部参数变化, 得到发电系统的最优发电成本。

关键词: 发电成本; 经济调度; 自适应差分进化; 非线性特征

Research on economic dispatching method based on adaptive differential evolution

LIU Mingming¹, WANG Qian¹, ZHAO Yixin², LI Weiqiang²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: The economic dispatch of a power generation system has a profound impact on the generation cost, and solved by using the adaptive differential evolution (ADEEA) algorithm based on external archiving. In the economic load dispatch problem, several variables such as active power, reactive power, voltage amplitude, and phase angle determine the economic dispatch cost, which is a nonlinear optimization problem that requires adjustment of relevant parameters to obtain the lowest generation cost. Adaptive differential evolution is used to solve the economic dispatch optimization problem. The algorithm is tested using an IEEE 30-node system, and the adaptive differential evolution algorithm is used to analyze external historical data comprehensively and introduce relevant external parameters to adjust internal parameter variations to obtain the optimal generation cost of the power generation system.

Key words: generation cost; economic dispatch; adaptive differential evolution; non-linearity

0 引言

近年来, 随着全球能源危机持续发酵, 发电成本不断刷新历史新高, 经济调度这一概念在电力系统中盛行^[1-2]。经济负荷调度是指在满足安全和电能质量的前提下, 合理利用能源和设备改

变网络中节点电压、功率、无功分布和潮流, 以及通过调节各发电机组, 让发电机组保持输出相应的最大或最小发电功率, 在满足发电系统动态稳定的基础上, 保持供需平衡, 以最低的发电成本或燃料费用保证对用户可靠供电的一种调度方

法^[3-4]。

从根本上来说, 由于受到有功功率、无功功率、变压器档位设置和并联电容器等多种参数的影响, 经济负荷调度就是一个非线性问题^[5], 因此多发电机组协调发电的问题较为棘手。文献[6-7]中提出使用微分方程、粒子群优化法和布谷鸟搜索等优化技术可以有效解决此非线性问题。针对多种分布式电源及不同电力用户组成的分布式电源系统, 提出分布式电源协调优化调度模型, 既考虑电源侧各分布式电源经济调度模型, 又加入需求响应模型, 利用MATLAB对算例进行求解, 并对结果的合理性进行分析。文献[8]中提出利用通用分布模型拟合不同功率预测水平下的实际功率分布, 建立了日前动态经济调度的随机优化模型。结合二次规划算法和内点法, 提出了一种两阶段优化算法用以求解对应的经济调度问题。

本研究是在自适应差分进化算法的基础上, 提出了一种自适应差分进化外部存档算法, 并通过负荷分配来解决经济负荷调度问题。在IEEE 30标准节点系统上进行计算分析仿真, 得出不同样本规模下的结果, 同时进行对比得出最优解。在一定的系统规模下, 可以实现发电成本最小化, 满足经济效益最大化。

1 方法研究

1.1 基于自适应差分进化算法

电力系统经济调度与有功功率、无功功率、变压器档位和电压水平等因素息息相关, 是一个含多个变量、具有非线性特征的问题, 用传统方法很难解决^[9]。

差分进化算法(Differential Evolution, DE)是一种新型、高效的启发式并行搜索技术, 具有收敛快、控制参数少、设置简单和优化结果稳健等优点^[10], 是现实应用中优化解决非线性问题的最好工具。经济调度通过采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、技术与粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)和布谷鸟(Cuckoo Search, CS)等优化方法可以获得

较好的结果, 但由于搜索空间的非线性特征, 使用这些方法使得收敛速度变慢。通过使用差分进化以及差分进化算法的紧凑结构, 可以在一定程度上矫正该问题^[11]。

许多混合技术使用差分进化法(DE)的组合, 比如自适应差分进化(ADE)、混合差分进化(HDE)和改进差分进化算法(IDE)^[12]。为了提高收敛性和获得最佳结果, 自适应差分进化需要在过程中改变参数, 并且已经默认无用户干扰。但是在某些特殊的应用中, 需要在优化过程中添加外部参数对内部变量进行干扰。本文将以“外部干扰差分进化”为中心, 根据时间变化改变相关参数, 进而得到最佳收敛率和最佳适应性下的最佳发电机单元组合。

1.2 IEEE 30节点系统

本文以IEEE 30标准节点系统为基础进行算法模拟和仿真, 其结构如图1所示。

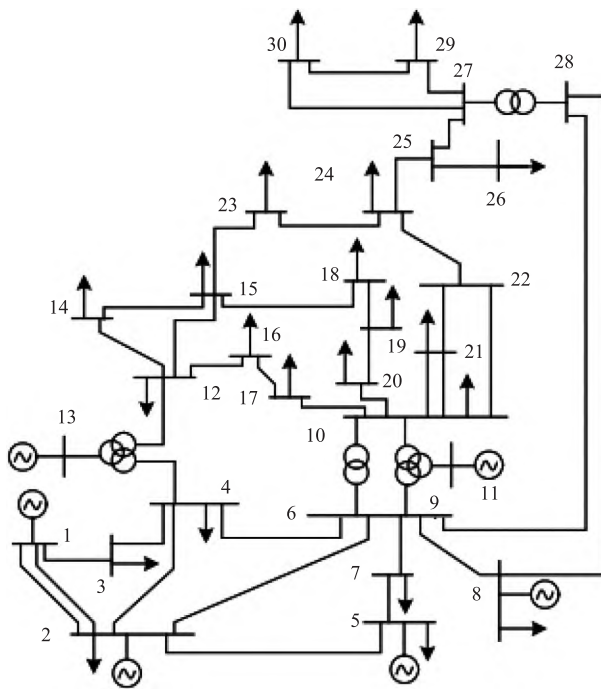


图1 IEEE 30节点系统结构图

Fig. 1 IEEE 30 bus system structure diagram

IEEE 30节点模型中包括变压器、无功补偿设备、总负荷、发电机和线路等元件, 系统中有6个发电机节点, 其节点编号为1、2、5、8、11和13。通过设置变压器初始电压比 T_{DG} 、相应节

点的导纳矩阵和节点阻抗矩阵作为其初始参数，导入仿真系统，从而更客观地对比分析出不同情况下的发电最优成本。

1.3 参数定义

通常来说，解决经济负荷调度问题一般都会使用差分进化算法。但由于负荷变化的动态性，算法参数在评价时间内不会改变。本文提出了一种自适应的差分算法来解决经济负荷调度问题，即在不考虑负荷的动态变化和算法参数变化的基础上，通过调节系统中的各个发电机功率、电容器供入系统无功功率大小和变压器档位等参数，使用差分进化法解决问题。

因此，在执行自适应差分算法的过程中，比例因子、边界条件以及种群大小等因素将跟随变化，从而匹配出最优参数的发电系统模型，计算出最优发电成本。

本文通过节点注入有功功率 P 、节点注入无功功率 Q 、变压器分接头位置 T 和节点电压幅值 V 等参数来考虑非线性约束。控制变量中，电压、有功功率和无功功率都是连续变化的变量，档位是离散的变量，下面将对相关函数及参数进行定义。

(1) 最优潮流 (Optimal Power Flow, OPF) 问题及数值

最小化函数及其约束条件表示为

$$\text{Min } F(\alpha, t) \quad (1)$$

$$g_n(\alpha, t) = 0 \quad (2)$$

$$h_{\min} \leq h(\alpha, t) \leq h_{\max} \quad (3)$$

式中，参数 α 表示本文参考系统中状态变量的向量，表达式为

$$\begin{aligned} \alpha = [& P_{DG1}, P_{DG2}, \dots, P_{DGN}, \\ & V_{DG1}, V_{DG2}, \dots, V_{DGN}, \\ & T_{DG1}, T_{DG2}, \dots, T_{DGN}, \\ & Q_{DG1}, Q_{DG2}, \dots, Q_{DGN}] \end{aligned} \quad (4)$$

式中， P_{DGN} 为发电机节点编号； V_{DGN} 为网络中各节点电压编号； T_{DGN} 为有载调压变压器编号； Q_{DGN} 为并联电容器（注入无功功率）编号。

(2) 系统操作和安全限制的约束条件

1) 发电机输出的有功功率和无功功率约束条件如下

$$P_{DG\min} \leq P_{DG} \leq P_{DG\max} \quad (5)$$

$$Q_{DG\min} \leq Q_{DG} \leq Q_{DG\max} \quad (6)$$

2) 网络中各节点电压的幅值约束条件如下

$$V_{DG\min} \leq V_{DG} \leq V_{DG\max} \quad (7)$$

3) 变压器档位调节范围为

$$T_{DG\min} \leq T_{DG} \leq T_{DG\max} \quad (8)$$

4) 电容器组输入的无功功率范围为

$$Q_{DG\min} \leq Q_{DG} \leq Q_{DG\max} \quad (9)$$

(3) 发电燃料成本最小化

通常OPF发电燃料成本函数可以用如下二次方程表示

$$\min(FT) = \sum_{DG=1}^N F_{DG}(P_{DGN}) \quad (10)$$

$$F_N P_{DGN} = a_N + b_N P_{DGN} + c_N P_{DGN}^2 \quad (11)$$

2 算法步骤

本文主要算法参数将通过以下步骤进行创建，现将程序简要说明如下。

1) 参数设置：最大值、最小值、电力系统成本曲线系数和总负荷需求，本文使用十进制编码形式。

2) 设定控制变量：问题范围、样本大小和发电机数量。

3) 选取系统的初始状态作为初始参数：试验向量、随机样本、样本成本、样本适应度和最优指数解。

4) 创建样本并初始化该模型内每个参数。

5) 开始优化校验：① 确定存档最大尺寸 $\text{archive.NP} = \text{Afactor} * \text{NP}$ ；② 将解决方案存储在档案袋中 $\text{archive.pop} = \text{zeros}(D, \text{NP})$ ；③ 归档解决方案的函数值 $\text{archive.funvalues} = \text{zeros}(1, \text{NP})$ ；④ 运行每个个体样本，程序从1开始循环，直到NP次结束，for pp=1:NP；⑤ 如果goodF和goodCR为空，则暂停更新if it>1&&~isempty(goodCR)&&sum(goodF)>0。

6) 生成目标函数 F ： $F = \text{randCauchy}(D, 1, F_m, F_{\sigma})$ ；由于不期望 $F=0$ ，那么若 $F \leq 0$ ，

则重新创建*F*，到0不会停止。

选择最少两个最优解：

pNP = max(round(p * NP), 2);

随机选择一个前100%的解决方案：

Xrbest = Xr(:, randindex);

选择一个非本样本集生成的其他参数：

cols = floor(rand(D, 1) * D)+1;

7) 验证边界约束条件，选择最佳个体，在当前和试验值之间取值，计算试验个体的适应度为

$$\begin{aligned} \text{costn} &= \text{costn} + (a_1(\text{ig}) * (X(\text{ig}, 1))^2 + \\ &\quad (b_1(\text{ig}) * X(\text{ig}, 1) + c_1(\text{ig}))) \\ \text{fitn} &= \frac{1}{\text{costn}} \end{aligned}$$

8) 对比分析：①如果试验结果优于或等同于当前情况：if (fitn>fit(pp)); ②如果试验结果优于以往最好结果：if fitn>fit(iBest)。

9) 删除重复的元素或重复的解： %if length(IX) < size(popAll, 1)

10) 添加所有新个体: if size(popAll, 1) ≤ archive.NP。

3 仿真结果

本文采用基于差分进化的可选外部存档函数，在IEEE 30标准节点系统上进行了仿真，并给出了不同样本规模下的结果，说明了样本规模对最优解的影响。

本文分别在10、50和100样本规模下进行3次试验，3次试验的迭代次数不同，输出的结果如表1～表4所示。其成本与适应性曲线如图2～图4所示。

表 1 IEEE 30 节点结构的发电机成本系数

Tab. 1 Generator cost coefficients of IEEE 30 bus structure

节点 编号	成本系数			最小功率 / 最大功率 /	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	MW	MW
1	0.0	2.00	0.003 75	50	200
2	0.0	1.75	0.017 5	20	80
5	0.0	1.00	0.062 5	10	35
8	0.0	3.25	0.008 34	10	30
11	0.0	3.00	0.025	15	50
13	0.0	3.00	0.025	12	40

表 2 样本数为 10 时，有功功率工作点与发电总成本

Tab. 2 Real power operating point and total cost of power generation @ population size=10

节点 编号	最小功率 / MW	最大功率 / MW	节点运行功率 / MW
1	50	200	175.80
2	20	80	44.68
5	10	35	14.61
8	10	30	20.93
11	15	50	14.97
13	12	40	12.00
总成本 / 元		3 287.68	

表 3 样本数为 50 时，有功功率工作点与发电总成本

Tab. 3 Real power operating point and total cost of power generation @ population size=50

节点 编号	最小功率 / MW	最大功率 / MW	节点运行功率 / MW
1	50	200	192.09
2	20	80	41.10
5	10	35	10.00
8	10	30	10.00
11	15	50	16.91
13	12	40	12.00
总成本 / 元		3 266.73	

表 4 样本数为 100 时，有功功率工作点与发电总成本

Tab. 4 Real power operating point and total cost of power generation under different population sizes

节点 编号	最小功率 / MW	最大功率 / MW	节点运行功率 / MW
1	50	200	187.57
2	20	80	43.88
5	10	35	10.00
8	10	30	10.00
11	15	50	19.95
13	12	40	12.00
总成本 / 元		3 263.22	

由表2、图2可知，总样本数量为10时，最优发电成本为3 287.68元。然而，样本数量对发电成本有着非常大的影响，影响着基于IEEE 30标准节点系统的数据分析和仿真模拟。

样本数量只有1~2个时,由于采样值不足,无法获取足够的原始数据进行比较分析以及数据测验,导致在IEEE 30结构中无法识别最优解,成本居高不下,适应性极低,因此理论上无法求解出此情况下的最优发电成本。当样本数量增加至5个及以上时,由于迭代次数的增加,结果曲线明显有变好的趋势,证明推论的正确性,需要扩大样本,进一步观察相关变化。

由表3、图3的计算结果和仿真曲线可知,总样本数量为50时,几乎找到了该算法和该规模下的最优解。但同时,当迭代次数从15次增加到50次时,最低的发电成本变化不大,故无法准确判断是否找出最优解。若要取得最优解,需使得迭代次数进一步增加,且进一步分析仿真结果,故仍需进一步扩大样本规模。此时,最优发电成本为3 266.73元。

由表4、图4可知,当样本数量为100时,适应性和成本在80次迭代后明显发生变化,并逐渐趋于稳定。此时,相对于前两种情况,样本数量为100的结果最好,最低发电成本为3 263.22元。

本研究通过进一步的试验得出,如果样本数量继续增加至200个,得到的结果与样本数为100时得到的最优解差异非常微小。虽然可能会出现相对更低的发电成本点,但是由于迭代次数过多导致响应时间过长,不符合电力系统实时供需动态平衡的要求,对电网存在过多的负影响,因此,相对而言不会获得最好的方案。

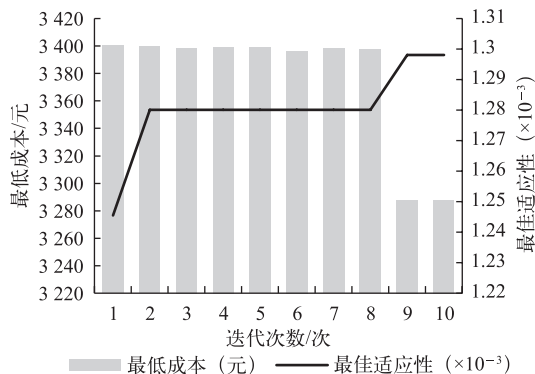


图2 成本与适应性曲线 (样本数量为10)

Fig. 2 Cost & fitness curve @ population size 10

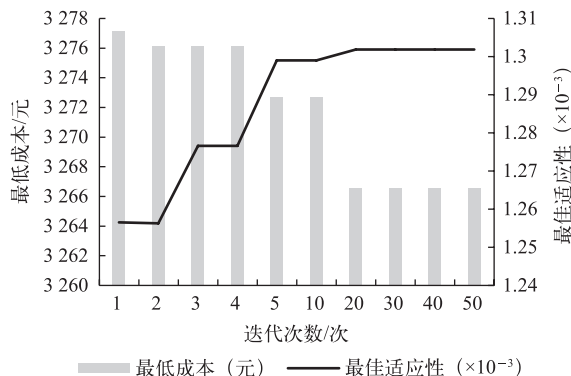


图3 成本与适应性曲线 (样本数量为50)

Fig. 3 Cost & fitness curve @ population size 50

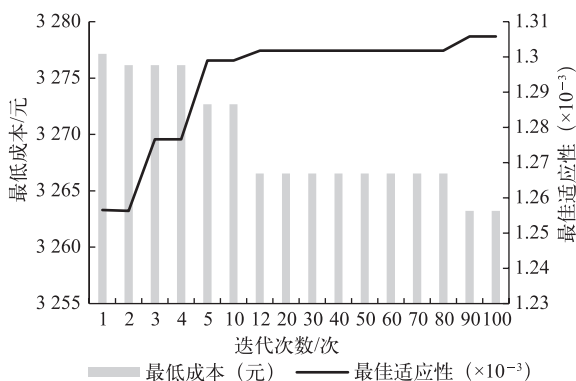


图4 成本与适应性曲线 (样本数量为100)

Fig. 4 Cost & fitness curve @ population size 100

4 结束语

本文利用基于差分进化的可选外部存档函数,在IEEE 30节点标准系统中模拟计算出最优解。主要是以“外部干扰差分进化”为中心,根据时间变化改变相关参数,通过测试以发电系统为模型的不同规模的样本,调节相关参数变化,进而得到最佳适应性和最佳发电机单元组合。

为保证测试结果具有可比性,在测试试验使用相同顺序的非线性特征。仿真结果表明,当样本数量较小时,无法获得最优解,即无法实现经济调度,从而获得当前规模下的最低发电成本。而当样本数量增大至50时,随着函数迭代次数的增加,可以获得非常接近最优解的发电系统经济调度方案。随着样本数量继续增大至90以上,目标函数输出获得最低的发电成本,经济调度可以实现。

但是,当规模进一步增大时,则会直接影响函数执行过程的响应时间。因此,当样本数量在80~100之间时,可以取得最优解和最佳适应性,实现发电成本最小化。

参考文献

- [1] 米剑锋,马晓芳.中国CCUS技术发展趋势分析[J].中国电机工程学报,2019,39(9):2537-2543.
- [2] JI Zhen, KANG Chongqing, CHEN Qixin, et al. Low-carbon power system dispatch incorporating carbon capture power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4615-4623.
- [3] 张劲,熊国江,邹晓松,等.含风电和径流式小水电的多目标环境经济调度[J].电力系统自动化,2021,45(9):38-45.
- [4] United Nations Industrial Development Organization. World small hydropower development report 2019[R/OL]. Vienna: United Nations Industrial Development Organization, 2019.
- [5] 刘自发,刘刚,刘幸.基于量子差分进化算法的分布式电源协调优化调度[J].电网技术,2013,37(7):1922-1928.
- [6] 于永进,梁荣波,历美璇,等.基于改进布谷鸟算法的电力系统最优调度研究[J].智慧电力,2019,47(5):65-70.
- [7] 崔杨,张家瑞,王铮,等.计及价格型需求响应的风-光-光热联合发电系统日前调度策略[J].中国电机工程学报,2020,40(10):3103-3113.
- [8] 王步云,张成刚,郭斌.含风电和光伏的电力系统多目标经济调度[J].自动化技术与应用,2020,39(3):108-112.
- [9] FERRANTE N, VILLE T. Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis[J]. Artificial intelligence, 2010, 33(1/2): 61-106.
- [10] ROY P K, BHUI S. A multi-objective hybrid evolutionary algorithm for dynamic economic emission load dispatch[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 26(1): 49-78.
- [11] 崔杨,邓贵波,赵钰婷,等.考虑源荷低碳特性互补的含风电电力系统经济调度[J].中国电机工程学报,2021,41(14):4799-4815.
- [12] 陈功贵,陈金富.含风电场电力系统环境经济动态调度建模与算法[J].中国电机工程学报,2013,33(10):27-35.

作者简介

刘明明(1991—),男,本科,工程师,主要研究方向为电网调可靠性管理、安全督查。

(收稿日期:2021-10-15)