

基于改进粒子群算法的配电网 网架优化研究

王 姝, 张海龙, 王恩荣

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 配电网网架优化是一个多目标综合优化问题, 粒子群算法因其易实现、收敛速度快等特点逐渐成为电力系统优化领域研究热点之一. 针对粒子群算法易陷于局部最优问题, 提出一种基于聚类策略的改进粒子群算法, 动态地将粒子聚类为三种级别的粒子并对应采用不同的学习模型更新速度, 增强了粒子群体多样性和全局搜索能力. 通过算例仿真验证了算法在配电网网架优化问题上的可行性.

[关键词] 配电网, 网架优化, 聚类分层, 粒子群

[中图分类号] TM726.3 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2020)01-0015-05

Study on Distribution Network Optimization Based on Modified PSO

Wang Shu, Zhang Hailong, Wang Enrong

(School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Distribution network optimization is a multi-objective comprehensive problem. Meanwhile, particle swarm optimization(PSO) has become a hotspot in the field of power system optimization due to its easy implementation and fast convergence. To avoid trapping in local optimality, a modified PSO particle swarm optimization algorithm based on clustering strategy is proposed in this paper. Wherein, particles are dynamically clustered into three levels. Correspondingly, different learning models are used to update speed, thus enhancing the particle diversity and global search capabilities. The superiority of the proposed algorithm in distribution network optimization is verified by numerical simulation.

Key words: distribution network, grid optimization, cluster stratification, particle swarm optimization

目前,我国电网运行系统取得了很大成就,建设规模不断扩大,运行结构也愈加复杂化,但运行安全性遭到巨大威胁^[1-4]. 我国供电还存在着可靠性低,电能质量差等问题. 优化目标网架需多方面考虑相关因素,通过优化方法以提高目标网架的整体质量^[5].

配电网优化多采用优化算法,主要包括经典数学优化算法和启发式算法^[6]. 经典算法包括线性与非线性规划、动态规划等. 文献[7]采用的最小生成树算法,理论结果很好,但实际应用于配电网规划优化时间长且程序占用内存大,成本较高. 相对于经典数学方法,启发式算法具有更强的实用性. 文献[8]采用蚁群算法适用于路径寻优,但其解的性能优劣多取决于正反馈强度的大小. 文献[9]采用遗传算法,理论上能够得到全局最优解,但易出现收敛速度慢及陷入局部最优等问题. 粒子群算法因其容易实现、收敛快的特点,广泛应用于多项领域,而电力系统领域起步较晚^[10]. 文献[11]采用混合粒子群优化算法,比基本 PSO 算法有更好的收敛效果. 文献[12]采用量子粒子群算法,引入量子机制增强全局搜索能力. 文献[13]采用模糊自适应粒子群优化算法,具有更快的收敛速度和更好的全局搜索能力.

本文考虑粒子群算法在寻优上的优势,并针对其易陷于局部最优的问题,提出基于聚类策略的改进粒

收稿日期:2019-05-14.

基金项目:南京师范大学企业合作项目(KJZX17015).

通讯作者:张海龙,博士,副教授,研究方向:电工理论与新技术. E-mail:61204@njnu.edu.cn

子群算法. 动态划分三类粒子并采用相应的学习模型, 以增强种群多样性以提高全局搜索能力. 在已知供电范围和待扩建线路的基础上, 以规划年综合费用为目标函数, 运用改进算法实现网架优化, 通过算例验证本文算法在解决配电网网架优化问题上的可行性.

1 网架优化模型的建立

本文以年综合费用最小为目标, 建立网架优化模型, 主要由线路投资折旧费用和运行年电能损耗费用, 目标函数为

$$\min f(\mathbf{X}) = f_1 + f_2. \quad (1)$$

式中, $f(\mathbf{X})$ 为综合费用.

(1) 线路投资折旧费用 f_1 为

$$f_1 = \sum_{i,j=1}^n (K_1 + K_2) l_{ij} a_{ij} x_{ij}. \quad (2)$$

式中, n 为总节点数, i 为变电站编号, j 为负荷点编号, K_1 为年投资率, K_2 为折旧费用率, l_{ij} 为 i 与 j 间的线路长度, a_{ij} 为 i 与 j 间单位长度线路建设的投资费用, x_{ij} 为 \mathbf{X} 的元素, $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times n}$ 表示 i 与 j 之间连线, 架设线路时取 $x_{ij} = 1$, 不架设时取 $x_{ij} = 0$.

(2) 运行年电能损耗费用 f_2 为

$$f_2 = K_3 \sum_{i,j=1}^n \tau_{\max} \Delta p_{ij} x_{ij}. \quad (3)$$

式中, K_3 为电价, τ_{\max} 为最大负荷利用小时数, Δp_{ij} 为 i 与 j 间的有功损耗.

约束条件如下:

(1) 线路潮流约束:

$$\mathbf{A}_t \mathbf{P}_t = \mathbf{D}_t \quad (t = 1, 2, \dots, T). \quad (4)$$

式中, \mathbf{A}_t 为 t 时段的节点和线路有功的关联矩阵; \mathbf{P}_t 为 t 时段的线路流动有功功率; \mathbf{D}_t 为 t 时段的节点注入有功功率.

(2) 容量约束:

$$P_{ij} \leq P_{\max}. \quad (5)$$

式中, P_{ij} 为 i 与 j 间的潮流, P_{\max} 为支路最大容量.

(3) 电压降落限制:

$$\Delta U_{\min} < \Delta U_{ij} < \Delta U_{\max}. \quad (6)$$

式中, ΔU_{ij} 为 i 与 j 间的电压降落; ΔU_{\max} , ΔU_{\min} 分别为支路上允许的电压降落最大、最小值.

(4) 电压偏移约束:

$$|\Delta U_i| < \varepsilon. \quad (7)$$

式中, ΔU_i 为节点 i 上的电压偏移值; $\Delta U_i = \frac{U_i - U_N}{U_N} \times 100\%$, ε 为线路上节点电压的最大允许偏移值.

(5) 辐射状网络结构约束:

$$\min f(\mathbf{X}) = \begin{cases} \sum_{i,j=1}^n (K_1 + K_2) l_{ij} a_{ij} x_{ij} + K_3 \sum_{i,j=1}^n \tau_{\max} \Delta p_{ij} x_{ij}, \\ U_m. \end{cases} \quad (8)$$

式中, U_m 为非辐射状网惩罚值, 取值足够大, 以排除非可行解.

2 基于聚类策略的改进粒子群算法的配电网网架优化

2.1 算法介绍

基本粒子群算法是通过粒子在解空间追随最优的粒子进行搜索, 原理简单且收敛速度快, 但全局搜索能力不足, 易陷入局部最优^[14]. 为此, 本文提出一种基于聚类策略的改进粒子群算法, 以分级聚类作为切入点, 动态地将粒子划分成 A 级、B 级、C 级 3 个类型, 相应地采用 3 种不同的学习模型以增加种群多样

性、提高搜索速度. 对于领域内有较大可能性存在更优解的 A 级粒子,采用局部学习模型,增强局部搜索能力;对于中间阶层的 B 级粒子,因其需要兼顾整个群体,仍采用基本学习模型;而对于较差的 C 级粒子,采用全局学习模型,使其在较大范围内随机搜索以增加多样性.

设种群规模为 m ,搜索空间为 n 维,第 i 个粒子在 t 时刻的位置向量为 $\mathbf{X}_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{in}^t)$,速度向量为 $\mathbf{V}_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{in}^t)$. 优化过程中,对全部粒子按适应度值大小进行降序排列,由大及小表示粒子优劣程度递增. 产生的新序列,序号越小则适应度值越优,并以此作为粒子优劣的唯一标准. 设定 A 、 B 级粒子间界限为 $L_{A,B}$, B 、 C 级粒子间界限为 $L_{B,C}$,更新方式如下:

$$L_{A,B} = \frac{m}{8} + m * \left(0.5 - \frac{t}{T}\right)^3, \quad (9)$$

$$L_{B,C} = \frac{7m}{8} + m * \left(0.5 - \frac{t}{T}\right)^3. \quad (10)$$

式中, t 为当前迭代次数, T 为最大迭代次数.

(1) 若 $\text{num } \mathbf{X}_i \leq \text{num } \mathbf{X}_1 < L_{A,B}$, 则该粒子为 A 级粒子. 其中 $\text{num } \mathbf{X}_1$ 为重新排序后全局最优粒子的序号, $\text{num } \mathbf{X}_i$ 为第 i 个粒子重新排序的序号, 对此类粒子选用局部学习模型, 速度更新方式如下:

$$\begin{cases} v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 r_1 (p_{ij} - x_{ij}^t) + c_2 r_2 (\bar{A} - x_{ij}^t), \\ x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1}. \end{cases} \quad (11)$$

式中, \bar{A} 为 A 级粒子的位置期望值.

(2) 若 $L_{A,B} \leq \text{num } \mathbf{X}_i < L_{B,C}$, 则该粒子为 B 级粒子, 对此类粒子沿用基本学习模型, 速度更新方式如下:

$$\begin{cases} v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 r_1 (p_{ij} - x_{ij}^t) + c_2 r_2 (g_j - x_{ij}^t), \\ x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1}. \end{cases} \quad (12)$$

(3) 若 $L_{A,B} < \text{num } \mathbf{X}_i \leq \text{num } \mathbf{X}_m$, 则该粒子为 C 级粒子, 对此类粒子采用全局学习模型, 速度更新方式如下:

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} \text{rand} * (x_{ij}^u - x_{ij}^l), & \text{rand} < 1 - \frac{t}{T}, \\ \hat{x}_{ij}^{t+1}, & \text{其他}. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_2 r_2 (\bar{p} - x_{ij}^t), \\ \hat{x}_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1}. \end{cases} \quad (14)$$

式中, \bar{p} 为当前迭代次数下粒子的期望值, x_{ij}^u 、 x_{ij}^l 为粒子所处位置的上、下界.

2.2 算法流程

算法流程如图 1 所示.

3 算例分析

为验证基于聚类策略的改进粒子群算法在网架优化问题上的实用性,采用如图 2 所示的初始网架结构进行优化. 该网架含有 16 个节点数、28 条支路. 支路相关参数如表 1, 节点负荷如表 2. 主要参数设置为: $\tau_{\max} = 4000$ h, $K_3 = 0.5$ 元/(kW·h), $K_1 = K_2 = 0.155$, 线路单位建设费用为 20.5 万元/km.

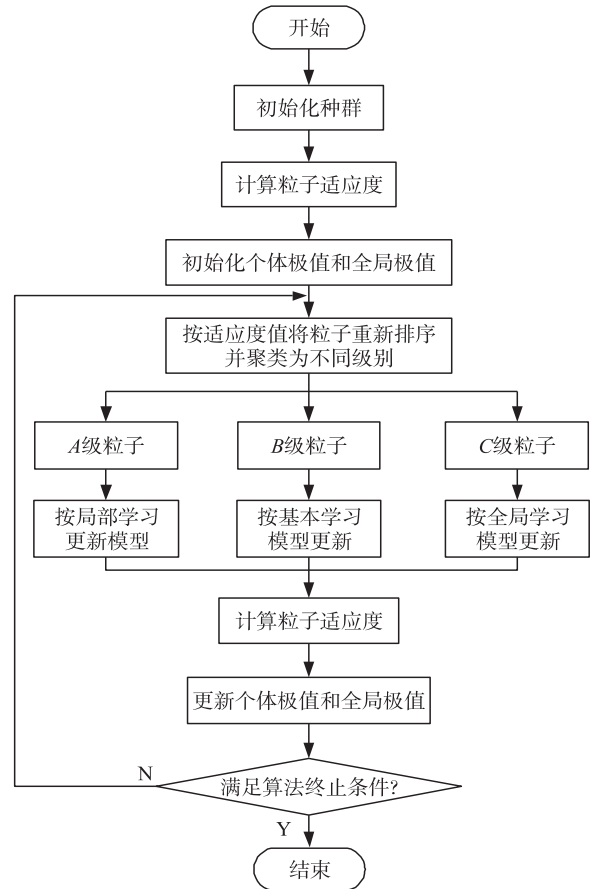


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

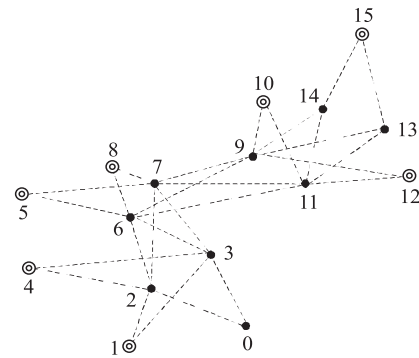


图 2 原始网架结构

Fig. 2 Original grid structure

表 1 支路相关参数
Table 1 Branch correlation parameters

路径起—终	长度/km	路径起—终	长度/km	路径起—终	长度/km
0~2	7.5	5~6	8	9~13	7
0~3	8.2	5~7	11.43	9~14	6
1~2	6	6~8	6	10~11	9
1~3	7.1	6~9	7.5	11~12	6.5
2~4	8	6~11	7.5	11~13	6.8
2~6	7.5	7~8	2.7	11~14	6
2~7	9.9	7~9	4.69	13~15	8.53
3~4	9.9	7~11	5.31	14~15	8
3~6	6.9	9~10	8		
3~7	9.3	9~12	7.5		

表 2 节点负荷表
Table 2 Nodal load meter

节点	容量/MVA	负荷/kW	节点	容量/MVA	负荷/kW
0	0	86.2	8	341.8	114.2
1	377	83.4	9	0	78.3
2	0	114.2	10	311	112.6
3	0	88.3	11	0	101.4
4	41.3	76.2	12	248	108.1
5	49.3	74.1	13	0	78.3
6	0	114.2	14	0	82.3
7	0	82.3	15	124	98.3

通过基于聚类策略的改进粒子群算法生成的网架优化结果如图 3 所示,该算例很好地验证了改进算法在网架优化中的可行性. 为验证本文算法的优劣性,采用基本粒子群算法求解算例,将所得结果与上述结果进行对比,收敛曲线如图 4,对比结果如表 3 所示.

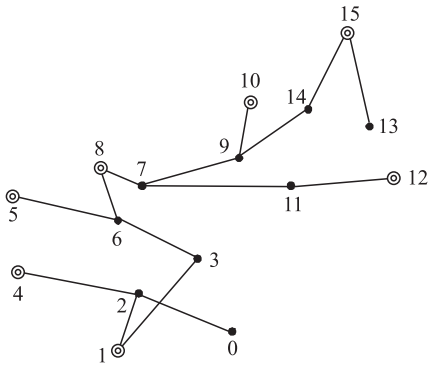


图 3 优化后网架结构图
Fig. 3 Structure diagram of the optimized network frame

由表 3 数据可知,本文算法求解算例,相较于基本 PSO 算法具有更快的收敛速度且所得的优化方案综合费用更低,验证了本文算法在求解网架优化问题上的实用性和可行性.

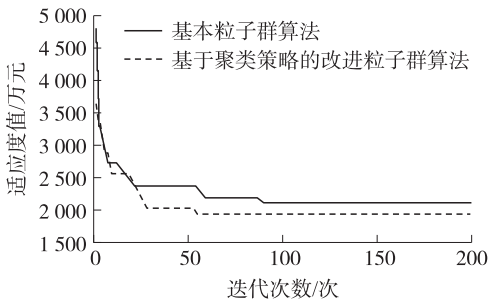


图 4 两种优化算法的收敛曲线图
Fig. 4 The convergence curves of the two optimization algorithms

表 3 两种优化算法的迭代次数比较
Table 3 Comparison of iteration times of the two optimization algorithms

算法类型	迭代次数/次	适应度值/万元
基本粒子群算法	89	2 062.2
基于聚类策略的改进粒子群算法	56	1 944.3

4 结论

本文以年综合费用作为目标函数,采用基于聚类策略的改进粒子群算法,动态地将粒子聚类成 3 个级别,并对应采用不同的学习模型更新速度,增强了群体多样性以跳出局部最优,全局搜索能力得到提高,算例求解结果验证了该改进粒子群算法在目标网架优化问题上的实用性.

[参考文献] (References)

- [1] 尤毅,刘东,钟清,等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):177-183.
- [2] LIU Z H, WEI H L, ZHONG Q C, et al. Parameter estimation for VSI-Fed PMSM based on a dynamic PSO with learning strategies[J]. IEEE Transaction on Power Electrics,2017,32(4):3154-3165.
- [3] 朱伟文. 配网结构优化及配网自动化探讨[J]. 科技创新与应用,2012,1(2):89.
- [4] 章文俊,程浩,程正敏,等. 配电网优化规划研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(5):16-23.
- [5] 曹昕璐,卫志农,沈海平,等. 考虑电网结构脆弱性的配电网网架优化规划[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):178-183.
- [6] 化晨并,黄振华,张刚. 基于改进遗传算法的配电网网架结构优化规划[J]. 山东电力技术,2015,22(3):16-18,52.
- [7] 刘健,杨文字. 基于最小生成树算法的配电网架扩展规划[J]. 电力系统自动化,2005,29(17):34-39.
- [8] 赵书强,王磊. 改进蚁群算法在配电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(24):61-65.
- [9] 余健明,吴海峰,杨文字. 基于改进多种群遗传算法的配电网规划[J]. 电网技术,2005,29(7):36-40.
- [10] 李炳宁,萧蕴诗,汪镭. PSO 算法在工程优化问题中的应用[J]. 计算机工程与应用,2004,18(3):74-76.
- [11] 符杨,徐自力,曹家麟. 混合粒子群优化算法在电网规划中的应用[J]. 电网技术,2008,32(15):31-34.
- [12] 许磊. 量子粒子群算法在电网规划中的应用[J]. 科学技术与工程,2012,12(2):322-324.
- [13] 王志新,徐辰婧,蔡金锭,等. 一种模糊自适应粒子群优化在配电网规划中的应用[J]. 电工电气,2011,18(12):23-25.
- [14] 徐珍霞,顾洁. 粒子群优化算法在配电网网架优化规划中的应用[J]. 继电器,2006,34(6):29-33.

[责任编辑:陈 庆]