

含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化

吕忠, 周强, 蔡雨昌

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对含分布式电源的配电网无功优化的特点, 提出一种将入侵杂草算法与差分进化算法相结合的混合求解算法。该算法将一组初始可行解进行繁殖、空间扩散, 当达到环境允许的最大值时, 通过引入竞争机制, 选取适应度较高的部分个体, 再通过变异、交叉、选择, 最终保留最佳个体。该算法既利用了入侵杂草算法结构简单、参数少和鲁棒性强的优点, 又通过结合差分进化算法, 克服其易陷入局部最优, 精度不高的缺陷。以 IEEE33 节点系统进行仿真分析, 并与传统的入侵杂草优化算法进行比较, 结果表明该算法具有较强的全局搜索能力以及较高的收敛精度, 能够有效地减少功率损耗。

关键词: 配电网; 分布式发电; 无功优化; 杂草入侵优化; 差分进化

Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm

LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: According to the feature of reactive power optimization in distribution network with distributed generation, a new kind of hybrid algorithm, which is composed of invasive weed optimization (IWO) and differential evolution (DE) is proposed. A group of initial feasible solutions are reproduced and spatially dispersed, some of individuals which are higher adaptation degree are selected by introducing competition mechanism when they reach the maximum allowable environment, and the best individual is retained through mutation, crossover and selection. The algorithm utilizes advantages of simple structure, less parameters and robustness of IWO, and overcomes the drawback of being trapped in local optimum and lower accuracy in combination with DE. Comparison with original IWO in IEEE 33-bus system simulation analysis, the results show that the algorithm has stronger global search capability and higher degree of convergence and can effectively reduce the power loss.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307143).

Key words: distribution network; distribution generation; reactive power optimization; invasive weed optimization; differential evolution

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0069-05

0 引言

随着人们对电能的要求日益增加, 现代电力系统的规模不断扩大, 结构日益复杂, 电力系统安全稳定运行变得尤为突出^[1]。因此, 为了提高电能质量以及供电的可靠性, 发展分布式发电(Distribution Generation, DG)变得日益重要。同时分布式发电具

有投资小、灵活、高效、环保、能调节电网负荷峰谷差等优点^[2-4], 可以利用各种可再生能源来进行发电和供电。但是, 随着 DG 接入到电力系统中, 同时也改变了系统原有的潮流分布, 会对系统电压、损耗、可靠性等产生影响^[5]。但是通过电力系统无功优化控制, 能够极大地提高电网稳定性, 同时能够有效降低网损, 因此研究含分布式电源的无功优化有重要意义。

含分布式电源的无功优化是一个复杂的多约束、多变量、非线性规划的含整数以及浮点规划问题^[6-7]。本文利用差分进化入侵杂草算法(Differential Evolution Invasive Weed Optimization, DEIWO)对含

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U1134205); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2014J009-B); 国家自然科学基金(51307143); 朔黄铁路发展有限责任公司科技开发项目(2012-607)

有分布式电源的配电网进行无功优化。入侵杂草算法与其他智能算法相比,具有结构简单、参数少、收敛速度快等优点^[8]。但是,同其他智能算法一样,入侵杂草算法同样存在容易陷入局部最优以及收敛精度不高等缺点,通过引入差分进化算法^[9],可以有效地使入侵杂草算法跳出局部最优,提高收敛速度以及收敛精度,进而得到最优解。结合无功优化的实际问题,对含有分布式电源的 IEEE33 节点配电网进行无功优化,进而证明该算法的有效性。

1 含分布式发电的电力系统无功优化数学模型

电力系统无功优化控制是通过调节变压器变比,发电机端电压以及补偿电容大小来使电力系统的有功功率损耗最小,并保证电压在规定范围之内。电力系统无功优化问题的基本数学模型包括目标函数、等式约束条件以及不等式约束条件三部分。但是,随着 DG 的引入将进一步增加电力系统无功优化的复杂度。因此,要综合考虑含 DG 的配电网系统的无功优化数学模型。

1.1 目标函数

本文以有功功率网损最小为目标函数。

$$\min F = P_{\text{loss}} + \eta_1 \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i - V_{il}}{V_{i\max} - V_{i\min}} \right)^2 + \eta_2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{Gi} - Q_{Gil}}{Q_{Gi\max} - Q_{Gimin}} \right)^2 \quad (1)$$

其中:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$V_{il} = \begin{cases} V_{i\max} & (V_i > V_{i\max}) \\ V_i & (V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max}) \\ V_{i\min} & (V_i < V_{i\min}) \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_{Gil} = \begin{cases} Q_{Gi\max} & (Q_{Gi} > Q_{Gi\max}) \\ Q_{Gi} & (Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max}) \\ Q_{Gimin} & (Q_{Gi} < Q_{Gimin}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{loss} 为有功功率的损耗; η_1 为电压越限惩罚系数; η_2 为发电机无功出力越限惩罚系数; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的导纳实部、导纳虚部和相位差; Q_{Gi} 为发电机无功功率; $V_{i\min}$ 、 $V_{i\max}$ 和 Q_{Gimin} 、 $Q_{Gi\max}$ 为对应变量的上下限。

1.2 等式约束条件

根据电力系统网络运行条件,各节点应该满足有功功率和无功功率平衡。

$$\begin{cases} \Delta P_i - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: ΔP_i 为节点 i 发电机有功功率、负荷有功功率以及 DG 有功功率之和; ΔQ_i 为节点 i 发电机无功功率、负荷无功功率以及 DG 无功功率之和。

1.3 不等式约束条件

不等式约束条件包括电网运行状态变量约束以及控制变量约束。

$$\begin{cases} Q_{Ci\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci\max} \\ T_{i\min} \leq T_i \leq T_{i\max} \\ U_{Gi\min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi\max} \\ V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \\ Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_{Ci} 为无功补偿容量; T_i 为变压器分接头档位; U_{Gi} 为发电机端电压; V_i 为负荷节点电压; Q_{Gi} 为发电机无功出力。

与一般配电网不同,当 DG 加入配电网后,需要对 DG 的出力进行一定的控制,使整体的无功优化效果更好,本文选取 DG 的有功出力作为控制变量,其约束条件为

$$P_{DGi\min} \leq P_{DGi} \leq P_{DGi\max} \quad (7)$$

此时,设 DG 的功率因数为 1。

2 差分进化入侵杂草算法基本原理

2.1 入侵杂草算法

入侵杂草算法,又称为野草算法(Invasive Weed Optimization, IWO)是最早由 Mehrabian 和 Lucas 于 2006 年提出的一种简单而高效的智能优化算法^[10]。同其他智能算法相比,该算法模拟自然界野草殖民策略^[11],具有较强的鲁棒性,随机性以及自适应性,因此该算法已经运用到各个领域,并取得良好的效果。

在 IWO 算法中,每一个杂草代表着该优化问题的一个可行解,所有杂草的集合称之为种群。在不断的进化过程中,杂草通过繁殖产生种子,种子在空间扩散,然后生长为杂草,周而复始,当种群中的杂草达到预设的最大值时,通过优胜劣汰策略,淘汰适应度低的杂草而保留适应度高的杂草。其具体的计算步骤如下^[12]。

(1) 初始化

确定变量可行解的边界范围, 在此范围内随机产生 N 个初始可行解。

(2) 繁殖

根据杂草的适应度大小产生不同数量的种子, 适应度高的产生较多的种子, 而适应度低的产生较少的种子, 其公式为^[13]

$$weed_n = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} (s_{\max} - s_{\min}) + s_{\min} \quad (8)$$

式中: f 为当前杂草的适应度值; f_{\min} 和 f_{\max} 分别对应为杂草的最小和最大适应度值; s_{\min} 和 s_{\max} 分别对应为一个杂草所产生种子的最小和最大值。

(3) 空间扩散

当产生的种子按一定的步长生长为杂草。同时, 新产生的杂草按照平均值为 0, 标准差为 σ 的正态分布分布在父代杂草的周围。同时其标准差 σ 随迭代次数的变化而变化, 在迭代开始时, 标准差较大, 所产生的种子距离父代杂草较远, 即产生的可行解探索范围较大, 随着迭代次数的增加, 标准差逐步变小, 所产生的种子距离父代杂草较近, 即产生的可行解探索范围较小。因此, 在迭代初期, 进行全局搜索, 当进化到迭代后期时, 又进行局部搜索^[14]。

$$\sigma_{iter} = \frac{(iter_{\max} - iter)^n}{(iter_{\max})^n} (\sigma_{\text{initial}} - \sigma_{\text{final}}) + \sigma_{\text{final}} \quad (9)$$

式中: $iter$ 为迭代次数; $iter_{\max}$ 为最大迭代次数; σ_{iter} 为当前迭代次数的标准差; σ_{initial} 和 σ_{final} 分别为初始标准差和最终标准差; n 为非线性调和因子。

(4) 竞争选择

经过若干次进化之后, 满足可行解范围的杂草数量达到最大值, 然后将杂草按照其适应度大小进行排列选择适应度较高的杂草而淘汰适应度较低的杂草。

不断重复以上过程, 直到达到最大迭代次数。

2.2 差分进化算法

差分进化算法^[15](Differential Evolution, DE)是一种基于群体差异的启发式随机搜索算法, 它是由 Storn 等人于 1995 年提出的, 最初是用于解决 Chebyshev 多项式。具有记忆个体最优解以及受控参数少等优点。其基本步骤如下。

(1) 初始化

首先确定 DE 算法的迭代次数, 即 $t = 0, 1, \dots, t_{\max}$ 。初始化种群 $S = \{X | X = (x_1, x_2, \dots, x_D)\}$, 使初始可行解尽可能随机分布在整个搜索空间。

(2) 变异

DE 通过差分方法实现个体变异, 随机选取种群中两个不同的个体, 将其进行缩放, 然后将待变异的个体与最优个体进行缩放, 最后与待变异个体进行结合。

$$Y_i(t) = X_i(t) + F \cdot (X_{\text{best}}(t) - X_i(t)) + F \cdot (X_{r_1}(t) - X_{r_2}(t)) \quad (10)$$

式中: $X_i(t)$ 为变异前个体; $Y_i(t)$ 为第 t 代变异后的新个体; F 为尺度因子; $X_{r_1}(t)$ 和 $X_{r_2}(t)$ 分别为第 t 代两个不同的个体; $X_{\text{best}}(t)$ 为第 t 代最优个体。

(3) 交叉

对第 t 代的 $X_i(t)$ 以及 $Y_i(t)$ 进行如下式的交叉操作。

$$U_{i,j}(t) = \begin{cases} Y_i(t), & \text{if } rand_j(0,1) \leq CR \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ X_i(t), & \text{otherwise} \end{cases}$$

式中: CR 为交叉概率; j_{rand} 为 $[1, 2, \dots, D]$ 的随机整数。

(4) 选择

比较 $U_{i,j}(t)$ 与 $X_i(t)$, 如果 $f(U_{i,j}(t))$ 优于 $f(X_i(t))$, 则 $X_i(t+1) = U_{i,j}(t)$, 反之则 $X_i(t+1) = X_i(t)$ 。

2.3 基于 DE 改进 IWO 在无功优化中应用

在不断的迭代过程中, 杂草入侵的殖民策略不断在自然环境内扩张, 进而保证个体的多样性。同时, 采用差分进化算法从当前种群中获得信息, 通过变异来获取当前种群的优秀个体的同时, 使杂草的进化方向不断地向着较好的个体靠拢^[16]。这样既能保证种群的多样性, 又能够一定程度地提高搜索速度以及搜索精度。

基于 DEIWO 含 DG 的电力系统无功优化中, 将控制变量 Q_{ci} , T_i , U_{Gi} , P_{DG} 作为杂草, 再代入到潮流方程中进行潮流计算, 得到有功功率网损, 将有功功率的网损最小值作为最优适应度值再根据 DEIWO 基本原理进行反复地迭代计算, 最终输出最优值, 其具体的计算步骤如图 1。

3 算例分析

(1) IEEE33 节点系统参数设置

本文采用 IEEE33 节点配电系统^[17]进行分析, 如图 2, DG 接入到 18 节点, 采取单点就地补偿方式。参数的基准电压为 10 kV, 系统基准容量为 10 MW。收敛精度 $\varepsilon = 10^{-4}$ 。变压器档位调节范围为 0.9~1.1(标么值, 下同), 分为 9 档, 单位档位调节量为 0.025。发电机机端电压的变化范围为 1.0~1.06。无功补偿容量的范围为 -0.05~0.05, DG 的有功出力范围为 0~0.15。

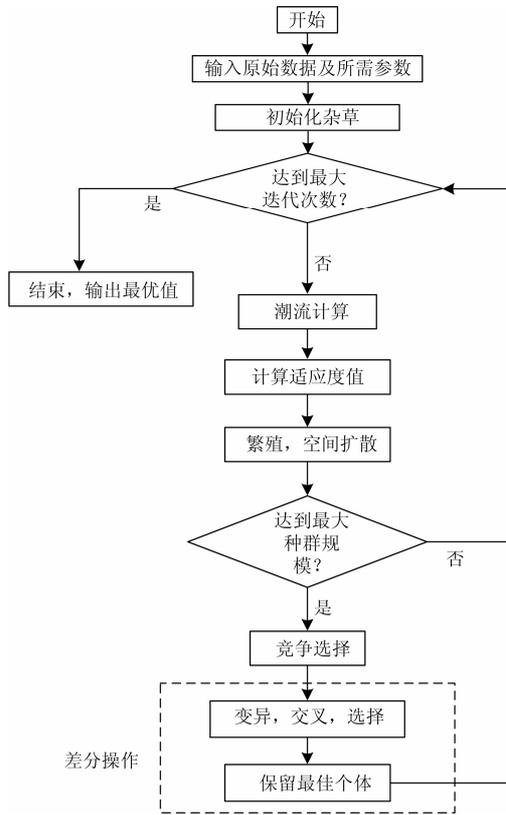


图 1 DEIWO 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of DEIWO

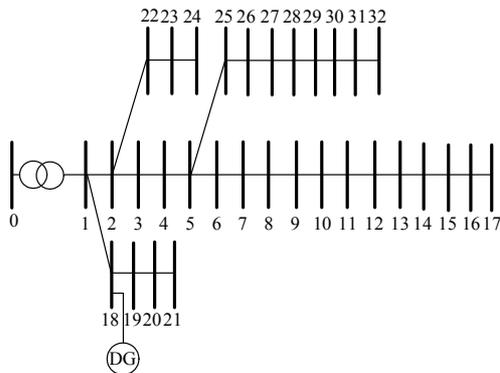


图 2 IEEE33 节点系统结构

Fig. 2 Structure chart of IEEE33 bus system

(2) DEIWO 算法参数设置

在入侵杂草部分算法中, 迭代次数设置为 50。初始杂草数以及最大杂草数分别为 10 和 15。种子个数的变化范围为 1~15, 初始标准差以及最终标准差分别为 2 和 0.01。非线性因子为 3。在差分进化部分算法中, 变异系数为 0.4。交叉系数为 0.1。其 IWO 算法参数设定值与 DEIWO 相同。

由表 1 可知, 与优化前相比, 优化后网损有较大幅度的降低。通过比较 IWO 与 DEIWO 优化后的

网损可知, 基于 DEIWO 算法进行优化后的网损更低, 仅为优化前网损的 48.7%, 同时, 由图 3 的进化特性曲线可知, 基于 DEIWO 算法于第 8 次达到收敛, 而基于 IWO 算法则在第 28 次才达到收敛, 前者的收敛速度明显快于后者的收敛速度。

表 1 优化结果比较

Table 1 Comparison of reactive power optimization result

控制变量及网损(标么值)	优化前	优化后	
		IWO	DEIWO
发电机端电压	1.05	1.044 5	1.043 3
变压器变比	1	1.025	1.025
补偿容量	0	0.049 5	0.049 9
DG 有功出力	0	0.071 2	0.070 3
网损	0.035 1	0.017 2	0.017 1

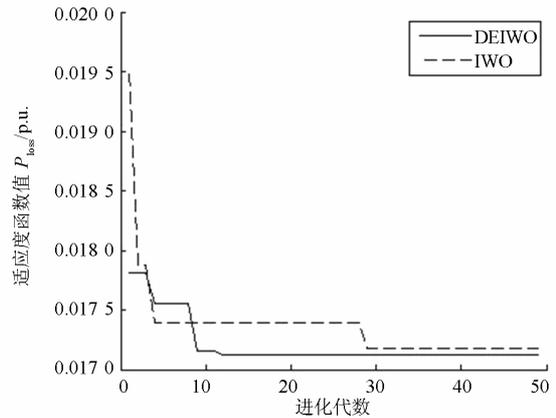


图 3 收敛特性曲线

Fig. 3 Curve of convergence characteristic

由图 4 可知, 基于 DEIWO 算法优化后, 节点电压水平得到了有效的提高, 同时, 并没有节点电压越限现象发生, 整体的电压水平基本接近于额定电压, 进而提高了电力系统供电质量。

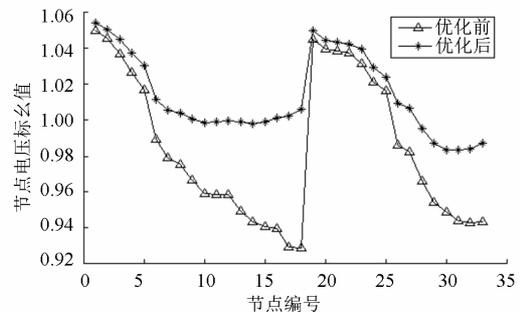


图 4 优化前后节点电压对比

Fig. 4 Variation of node voltage before and after optimization

4 结论

本文提出的改进入侵杂草算法是将传统的入侵杂草算法与差分进化算法相结合, 通过引入变异、交叉和选择, 丰富优化的搜索行为, 增加其效率, 最终获得更好的收敛结果。由于该算法与传统的智能优化相比, 具有参数较少、易于理解、便于编程的优点, 将在电力系统无功优化领域有着更为广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 王世丹. 含分布式电源的配电系统无功优化技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
WANG Shidan. Research on the reactive power optimization of distribution network including distributed generation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [2] 王瑞, 林飞, 游小杰, 等. 基于遗传算法的分布式发电系统无功优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 24-27.
WANG Rui, LIN Fei, YOU Xiaojie, et al. Research on the reactive power control of distributed generation system based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 24-27.
- [3] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.
MA Xiufan, CUI Huanjun. Improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.
- [4] 李鑫滨, 朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 137-143.
LI Xinbin, ZHU Qingjun. Application of improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 137-143.
- [5] 程杉, 陈民铀, 黄薏宸. 含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 45-50.
CHENG Shan, CHEN Minyou, HUANG Yichen. Multi-objective reactive power optimization of distribution system penetrated with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 45-50.
- [6] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.
ZHANG Li, XU Yuqin, WANG Zengping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.
- [7] 李晶, 王素华, 谷彩连. 基于遗传算法的含分布式发电的配电网无功优化控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 60-63.
LI Jing, WANG Suhua, GU Cailian. Research of reactive power optimization control in distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 60-63.
- [8] ZHOU Yongquan, CHEN Huan, ZHOU Guo. Invasive weed optimization algorithm for optimization no-idle flow shop scheduling problem[J]. Eurocomputing, 2014, 137(5): 285-292.
- [9] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [10] MEHRABIAN A R, LUCAS C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization[J]. Ecological Informatics, 2006, 1(4): 355-366.
- [11] ABUALNADI D I, ALSMADI O M K, ABOHAMMOUR Z S, et al. Invasive weed optimization for model order reduction of linear MIMO systems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(6): 4570-4577.
- [12] POURJAFARI E, MOJALLALI H. Solving nonlinear equations systems with a new approach based on invasive weed optimization algorithm and clustering[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2012, 4: 33-43.
- [13] SARAVANAN B, VASUDEVAN E R, KOTHARI D P. Unit commitment problem solution using invasive weed optimization algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014, 55: 21-28.
- [4] NIKOOFARD A H, HAJIMIRSADEGHI H, RAHIMIKIAN A, et al. Multiobjective invasive weed optimization: application to analysis of Pareto improvement models in electricity markets[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(1): 100-112.
- [15] PRICE K, STORN R, LAMPINEN J. Differential evolution — a practical approach to global optimization [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [16] BASAK A, MAITY D, DAS S. A differential invasive weed optimization algorithm for improved global numerical optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 219(12): 6645-6668.
- [17] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 196-198.

收稿日期: 2014-05-16; 修回日期: 2014-08-08

作者简介:

吕忠(1991-), 男, 硕士研究生, 从事电能质量分析研究; E-mail:lvzhong20091860@gmail.com

周强(1989-), 男, 硕士研究生, 从事电能质量分析研究。

(编辑 葛艳娜)