

文章编号:1005-2992(2017)04-0027-05

# 智能优化算法应用于分布式电源 配电网无功优化综述

孙 亮,吕凌虹,张秀琦,刘国炳

(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

**摘 要:** 由于分布式电源并网会给配电网潮流带来影响,所以 DG 并网后进行无功优化的必要性尤为凸显。将智能以及由此衍生的混合智能优化算法在含有 DG 并网的无功优化中的应用进行介绍,并针对配电网无功优化问题属于多变量,高纬度的非线性化问题;分析了在无功优化中,多目标的智能优化算法所带来的优越效果。最后,也对无功优化问题未来的方向进行了分析。

**关 键 词:** 分布式电源;无功优化;智能优化算法;混合智能优化算法;多目标智能优化算法

**中图分类号:** TM61

**文献标识码:** A

分布式发电(Distributed Generation, DG),是指分散在一定范围内,利用多种形式进行发电,发电设备共同发出电能向负荷供电,以就近满足用户的用电需求的发电形式<sup>[1]</sup>。近年来,经济发展迅速,致使人们对于用电的需求量日益增加,以可持续发展的新型发电方式来代替以往的化石能源,成为各国开始纷纷寻求的目标。分布式发电凭借其经济性、安全性、灵活性和可靠性,获得了众多能源专家的青睐<sup>[2]</sup>。

系统无功潮流的分布,会因系统结构的改变而改变。由分布式电源并网带来的原有单电源辐射结构的变化,改变了潮流,这也许会引起无功功率的不足或过剩,发生电压质量的下降乃至于越限。因此,对含有分布式电源的配电网进行无功优化有很重要的实际意义。无功优化算法主要包括传统的无功优化算法和新兴的人工智能算法<sup>[3]</sup>。虽然,传统无功优化算法是各个新兴算法的理论基础,但随着电网复杂性的增加以及各种优化理论的日益完善,基于随机搜索的智能优化算法具有较好的并行处理以及全局收敛特性,其实用性被更好地发掘出来<sup>[4]</sup>。本文综述了几种智能优化算法以及整合不同算法后的混合智能优化算法应用于含有 DG 的配电网中的优化效果与比较;并针对当前能源局势与输配电要求的日益提高的情况,分析了多目标智能优化算法在无功优化中的作用。

## 1 智能优化算法在无功优化中的应用

### 1.1 遗传算法

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法,是一种基于自然选择和基因遗传学原理的优化搜索方法<sup>[5]</sup>。遗传算法具有通用性强,并行性好,对可行性解表示广泛,群体搜索等特性。同时,它也具有收敛速度较慢,容易陷入局部最优等不足之处。

文献[6]中以  $P_{loss}$  最小为目标函数,应用改进的 DA 算法来对电力系统中各种变量进行优化选择。

收稿日期:2016-07-10

作者简介:孙 亮(1973-),男,博士,副教授,主要研究方向:新能源技术。

电子邮箱:419388060@qq.com(孙亮);646943365@qq.com(吕凌虹);956040087@qq.com(张秀琦);1571332803@qq.com(刘国炳)

为改善 GA 算法中所存在的不足,文中的交叉、变异概率使用自适应的方式,改善了以往 GA 算法一成不变的概率所带来的局限,并且通过增加一定的扰动,使种群变得更为多样,以避免早熟的出现,同时这也使陷入局部最优的情况得以改善。

文献[7]提出了节点无功补偿动态区间的计算方法,构建节点无功补偿动态区间,有效压缩算法搜索空间。在算法方面,将罚因子自适应调整机制及动态灾变算法等启发式算法引入进遗传算法中,形成混合启发式搜索算法,使得算法的寻优质量得以提升。

文献[8]提出将协同进化思想引入 GA 算法中,也就是将需要解决的问题映射为多个相互联系的种群,这样就把复杂的无功优化问题分解成多个遗传过程分开的并且彼此协同进化的子问题,有效的减小了搜索解空间。

## 1.2 粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)最早是由 Eberhart 和 Kelnnedy 提出的。它仿照鸟群觅食行为,使群体中的个体能通过相互之间的信息共享和自身经验的总结来修正其行动策略,最终求得最优化问题的解<sup>[9]</sup>。最优解的探索仍是通过每个粒子的竞争与合作来完成的,但它是在其解空间内,根据最优的粒子来使后续粒子进行尾随达到寻优效果,这是与遗传算法的不同之处。但它依然存在低收敛精度,难以跳出局部最优的问题。

文献[10]针对惯性权重  $\omega$  较大容易搜索范围过大,影响最优解出现, $\omega$  较小容易陷入局部最优的问题,提出了将不同惯性权重赋予不同的粒子的改进粒子群算法。这样,使得拥有较大和较小  $\omega$  的粒子分别用于搜索面积的增多和局部探索力度的加强,这样可以更有效使出现全局最优的情况减少。

文献[11]以  $P_{loss}$  最小为目的,提出了一种新的使  $\omega$  和学习因子动态变化的 PSO 算法。选择一种按指数规律越来越小的  $\omega$  策略和一种按  $\sin$  函数变化的学习因子,更好的调节了全局和局部的收敛能力。

文献[12]提出了一种带收缩因子的粒子群算法。将其应用到含风力发电机组的无功优化程序中进行优化,验证了这种算法的合理性与正确性。

## 1.3 免疫算法

虽然,类似 GA 算法的一系列算法可以较好的处理优化问题,但它们距离人工智能仍有较大差距。人们开始将视线放在和生物学有关的免疫知识运用到算法中去,提出了一种新的与 GA 算法相结合的免疫算法,大大提升了优化性能。在原有算法优点的基础上,使优化过程中常出现的退化现象得到有效控制,现在这种算法已经得到了大量的应用<sup>[13]</sup>。

文献[14]提出了一种新的基于聚类 and 竞争克隆机制的多智能体免疫算法。将高效问题求解能力的多智能体系统模型应用于免疫算法,并且将聚类和克隆增殖以及高斯和柯西混合变异算子引入其中,大大增强了全局搜索能力。

文献[15]提出了一种聚类和自适应改进型免疫算法。它首先通过聚类和克隆操作,使得免疫算法在深度和广度上都有了更好的搜索能力。为了使高亲和度的抗体能有更多机会保留下来,对亲和度低的则增高它的变异率,引进能使变异率动态调节的自适应算子,以便于形成全局最优解。

## 1.4 差分进化算法

差分进化算法是一种启发式性算法,Storn 和 Price 在 1995 年的科技报告首次提出了“差分进化”这个词。它仿照生物的进化过程的随机性,通过变异、交叉、选择算子等,产生了个体间的协作与较量产生种群智能,从而使适应性强的个体更容易被留下,降低了遗传操作的复杂性。同时,DE 特有的记忆能力使其可以动态跟踪当前的搜索情况,以调整其搜索策略,指导整个种群的进化<sup>[16]</sup>。

文献[17]将免疫原理与二次变异原理加入差分进化算法中,形成了改进的差分进化算法。免疫原理使交叉操作充分利用了进化过程中积累的优良特征信息,使算法收敛的速度极大地加快;而高斯扰动法的二次变异使种群更丰富了起来,经验证它对增加探索面积和避免局部收敛都有很好的提升作用。

文献[18]针对传统差分进化算法没有能够将进化学习过程中积累的经验来指引新的个体变异方

向的问题,引入了优良群体的概念,通过对该群体信息的提取,能使目标量与该群体信息作比较,从而能更快的确定交叉概率。因此,一种改进的能明显加快收敛的速度差分进化算法被提出并应用于实际中。

## 2 混合智能优化算法在无功优化中的应用

文献[19]提出了一种邻域搜索免疫算法,它是将免疫算法与邻域搜索进行融合。由于免疫算法后期搜索具有随机性、收敛性较差的弊端,采用邻域搜索可以保证在迭代末期算法能够稳定收敛到最优解;并在考虑不同类型 DG 影响的配电网重构情况下,实现了网损的最小化。

文献[20]采用遗传算法和 PSO 算法相结合的方法,这种算法不仅利用了 PSO 算法的学习记忆能力,具有快速收敛性,而且利用了遗传算法选择、交叉和变异操作产生结果的不确定性,使种群具有多样性,杜绝了粒子群算法易陷入局部最优的现象。

文献[21]将入侵杂草算法与 DE 算法相结合。使最初解能在空间内繁殖和扩散,当达到所允许的上限时,通过互相之间的竞争,使适应度较高的个体被选择下来,再通过变异、交叉、选择,最终保留最佳个体。这种方法结合了杂草法简单易行和 DE 算法不易于陷入局部收敛的优点,在进行试验和对比之后,表明该改进的算法能够更好的进行搜索和收敛,具有很好的应用前景。

## 3 多目标智能优化算法在无功优化中的应用

配电网无功优化问题属于多变量,高纬度的非线性化问题。随着社会的发展,人们对电力的需求日益增加,安全性和经济性也同时成为了我们关注的焦点。因而,除了对以往最经典和基础的单目标的无功优化问题—— $P_{\text{loss}}$  最小为核心目标之外,还应该考虑到电经济指标以及运行稳定性的问题。因此,多目标的智能优化算法在配电网无功优化中的应用更显示了其必要性和优势。

文献[22]同时将  $P_{\text{loss}}$ 、电压水平以及稳定指标作为目标函数,将模糊隶属度应用于将多目标问题转化为单目标,分开后再统一整合处理。对 DE 算法的控制参数引入了自适应调整模式,并将混沌优化理论与 DE 算法结合,在标准测试系统以及实际电网系统进行仿真,证明了文章所应用的研究成果对经济性和稳定性均具有很好的优化性能。

文献[23]中已然察觉到 DG 并网之后所带来的影响使以往的优化模型不能再继续满足人们的要求,因此采用了  $P_{\text{loss}}$  和  $\delta U$  最小,静态电压稳定裕度最大的多目标优化函数模型,并且它可以根据系统的变化来进行动态调整。通过擂台赛法构造非支配解集,形成解均匀分布的 Pareto 最优边界。运用改进的能够自动调节的惯性权重刷新粒子的 PSO 算法,使其具有更强的搜索性能。在计及异步风机并网的情况下进行分析,为今后的研究提供参考。

文献[20]在全场景下计及了  $P_{\text{loss}}$ 、静态电压稳定指标两个目标,结合免疫和二次变异思想改进了传统 DE 算法,在含风电机组的测试系统进行仿真,使人们最后可以根据结论来确定综合了几种目标的更加有优势和实用性的方案计划,增加了选择性。

## 4 无功优化的发展趋势

通过对以上综述可以发现,对于含 DG 的系统无功优化的困难之处在于变量多且类型复杂,并且需要全面融合的进行考虑。而智能优化算法在处理变量时,针对某一种方法的缺陷,将两种或以上算法进行融合之后,因其结合了多种算法的优势而更具有实用性。另外,仅仅考虑某一单独目标的优化模型已无法满足现今人们日趋增长的对电力运行的要求,为了更好的提高系统经济性和稳定性,多目标优化将成为为来的发展趋势。

风电作为可再生的清洁能源正在飞速发展,风电并网给常规电力系统带来了诸多影响,同时,也给



随机生产模拟提出了诸多挑战<sup>[24]</sup>。随着能源结构的改变,这些年来风力发电因其可再生性与清洁性,已被广泛的应用到分布式发电中,但众所周知,风机出力与环境 and 气候等因素息息相关,具有很大的不确定性,因而给我们进行无功优化带来了很大困难。于是,用于解决随机性问题的有效方法——场景分析法被更多的人所关注。它是通过将各种对应为各种不同场景的不确定因素进行组合,从而将不确定的模型用不同场景下的确定性模型来代替进行模拟。例如:文献[21]便是采用该方法,将含风机的不确定的情况转化为一系列确定的场景,根据每个场景的统计概率,建立含风机的优化模型,并采用改进的 DE 算法进行无功优化。另外,场景分析法在处理多目标问题上也显示了较好的性能,例如文献[20]。它便是先采用场景分析法,对含风机的系统中在各场景下确定单目标无功优化方案。接着建立了全场景下的多目标的无功优化模型,对比各 Pareto 最优解,可以尽可能多的为决策者提供能尽量兼顾多个目标的无功补偿方案。相信随着风电并网的快速发展,场景分析法也会越来越多的与其他方法相结合并不断改进,这也将成为配电网无功优化的一个主流发展趋势。

## 5 结束语

本文对应用新兴的智能优化算法来解决含 DG 的配电网的无功优化的问题进行了综述,分析了单一算法和混合算法在实际应用中的优缺点,发现混合智能优化算法由于其可以兼顾每种算法的好处与不足,扬长避短,因而在实际应用中更具有竞争力;并且,针对无功优化问题本身存在的复杂性,并考虑到现今人们日趋增长的对电力运行的要求,多目标优化问题将越来越成为今后的主要研究方向。另外,考虑到风机并网的重要型,简述了场景优化法作为研究不确定性因素的有效方法在现今的应用以及未来的发展前景及重要性。相信随着人们研究的不断深入和科技的不断发展,对于含 DG 并网的无功优化方法将更加完善。

## 参 考 文 献

- [1] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术,2003,27(12):71-75,88.
- [2] 梁才浩,段献中. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化,2001(12):53-56.
- [3] 王世丹,徐丽杰. 含分布式电源的配电系统无功优化研究[J]. 华北电力大学学报,2012,39(2):39-42,69.
- [4] 刘述奎. 基于自适应聚焦粒子群算法的电力系统无功优化[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [5] 梁科,夏定纯. Matlab 环境下的遗传算法程序设计及优化问题求解[J]. 电脑知识与技术:学术交流,2007(4):1049-1051.
- [6] 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.
- [7] 王卫平,王主丁,张峻,等. 含分布式电源的配电网无功优化混合算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(6):93-100.
- [8] 未超. 含分布式电源的配电网无功优化[D]. 天津:天津大学硕士学位论文,2013.
- [9] R. C. Eberhart, Shi Yuhui. Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization[C]. Annual Conference on Evolutionary Programming. San Diego, USA, 1998.
- [10] 袁松贵,吴敏,彭斌,等. 改进 PSO 算法用于电力系统无功优化的研究[J]. 高电压技术,2007,33(7):159-162.
- [11] 雷敏,杨万里,彭晓波,等. 基于改进简化粒子群算法的含 DG 的配电网无功优化[J]. 华北电力大学学报,2015,42(1):39-44.
- [12] 程站立. 计及分布式电源的配电网潮流计算及其无功优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- [13] 荣军. 仿生算法在多用户检测中的应用研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.
- [14] 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.
- [15] 曾黎琳. 含分布式发电的配电网无功优化方法研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2013.
- [16] R. Storn, K. Price. Differential evolution— a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4):341-359.
- [17] 冯肯. 含风电机组的配电网无功优化[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [18] 曾学强. 含风电机组的配电网无功优化及算法研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [19] 刘畅,黄民翔. 含多种分布式电源的配电网重构优化研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(6):13-18.
- [20] 涂超. 含分布式电源的配电网无功优化研究[D]. 南昌:南昌大学,2013.
- [21] 吕忠,周强,蔡雨昌,等. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(4):69-73.
- [22] 岑正君. 基于混沌自适应差分进化算法的无功优化研究[D]. 广州:广东工业大学,2015.

[23] 史浩宇,彭显刚. 基于改进 PSO 算法的风电并网系统电压无功优化研究[J]. 广东电力,2014,27(2):17-21,92.

[24] 孙亮,郝国屹. 计及风电并网的电力系统随机生产模拟改进方法[J]. 东北电力大学学报,2016,36(3):16-20.

## The Application of Intelligent Optimization Algorithm in the Reactive Power Optimization of the Distributed Power Distribution Network

Sun Liang, Lv Linghong, Zhang Xiuqi, Liu Guobing

(Electrical Engineering College, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012)

**Abstract:** In view of the impact of the distributed power grid, Reactive power optimization of distribution network containing DGs has very important practical significance. This paper introduces the developed intelligent optimization algorithm and the hybrid intelligent optimization algorithm in the application of reactive power optimization of distribution network containing DGs. And in view of the distribution network reactive power optimization problem belongs to the multivariable, the high nonlinear problem, this paper analyses the multi-objective intelligent optimization algorithm in the role of reactive power optimization. Finally it points out the development trend of reactive power optimization.

**Key words:** Distributed power; Reactive power optimization; Intelligent optimization algorithm; Hybrid intelligent optimization algorithm; Multi-objective intelligent optimization algorithms