

1-4-2019

Multiple Objective Planning of Distribution Network with Multiple Distributed Generations

Pan Huan

1. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; ;2. Ningxia Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, Yinchuan 750021, China; ;3. Ningxia Key Laboratory of Electrical Energy Security, Yinchuan 750004, China;

Xu Chen

1. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; ;

Yang Li

1. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; ;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multiple Objective Planning of Distribution Network with Multiple Distributed Generations

Abstract

Abstract: The types of distribution network with Distributed generations (DG), the location and capacity will impact on power grid operation and strict, such as unreasonable planning, the normal operation of the power grid have negative effects. Based on this, the main purpose of this paper is to study *when the new DG of distribution network access how to reasonable siting and sizing, specific arrangements are. To a real distribution system with a region as an example, the node were evaluated to determine candidate DG installation node, corresponding mathematical optimization model is established, in distribution power purchasing cost, DG operation and maintenance costs and DG allowance for the cost and the minimum as economic goals, with the node voltage stability index for stability goals by normalized weighting method to solve multi-objective optimization problem; Different intelligent algorithms are used to solve the DG programming problem.* By Matlab simulation, the DG planning scheme is analyzed.

Keywords

distributed generation, distribution network planning, multi-objective optimization, particle artificial fish swarm algorithm

Recommended Citation

Pan Huan, Xu Chen, Yang Li. Multiple Objective Planning of Distribution Network with Multiple Distributed Generations[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3826-3834.

含多种分布式电源的配电网多目标优化

潘欢^{1,2,3}, 徐陈¹, 杨丽¹(1. 宁夏大学物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏沙漠信息智能感知重点实验室, 宁夏 银川 750021;
3. 宁夏电力能源安全重点实验室, 宁夏 银川 750004)

摘要: 配电网中接入分布式发电装置(Distributed Generation, DG)的种类、位置和容量会严重影响电网的运行, 如不合理规划, 对电网的正常运行会产生负面影响。当配电网接入新DG时, 研究如何进行合理的选址与定容, 以配电网购电费用、DG运维费用和DG补贴费用之和最小为经济性目标, 以节点电压稳定性指标为稳定性目标, 采用归一化权重方法处理多目标优化问题; 以某地实际配电系统为例, 对节点进行评估, 确定DG的候选安装节点, 建立相应的数学优化模型; 采用不同的智能算法求解DG的规划问题, 通过Matlab仿真计算, 分析不同算法得到的DG规划方案。

关键词: 分布式发电; 配电网规划; 多目标优化; 粒子人工鱼群算法

中图分类号: TP91

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)10-3826-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810028

Multiple Objective Planning of Distribution Network with Multiple Distributed Generations

Pan Huan^{1,2,3}, Xu Chen¹, Yang Li¹(1. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
2. Ningxia Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, Yinchuan 750021, China;
3. Ningxia Key Laboratory of Electrical Energy Security, Yinchuan 750004, China)

Abstract: The types of distribution network with Distributed generations (DG), the location and capacity will impact on power grid operation and strict, such as unreasonable planning, the normal operation of the power grid have negative effects. Based on this, the main purpose of this paper is to study when the new DG of distribution network access how to reasonable siting and sizing, specific arrangements are. To a real distribution system with a region as an example, the node were evaluated to determine candidate DG installation node, corresponding mathematical optimization model is established, in distribution power purchasing cost, DG operation and maintenance costs and DG allowance for the cost and the minimum as economic goals, with the node voltage stability index for stability goals by normalized weighting method to solve multi-objective optimization problem; Different intelligent algorithms are used to solve the DG programming problem. By Matlab simulation, the DG planning scheme is analyzed.

Keywords: distributed generation; distribution network planning; multi-objective optimization; particle artificial fish swarm algorithm

引言

分布式发电(Distributed Generation, DG)具有



收稿日期: 2016-09-08 修回日期: 2016-11-26;
基金项目: 国家自然科学基金(61403219, 61463043);
作者简介: 潘欢(1983-), 男, 甘肃, 博士, 副教授,
研究方向为电力系统分析; 徐陈(1993-), 女, 湖北,
硕士, 研究方向为电力系统优化; 杨丽(1993-), 女,
天津, 硕士生, 研究方向为电力系统规划。

节约能源、减少污染、安全可靠、结构多样、削峰填谷等优势, 不仅可满足特殊场合的需求而且节省投资、丰富电力市场、促进经济发展, 日益受到人们的关注。大电网结合DG的供电方式被认为是减少投资、节能降耗、保证系统安全可靠运行的重要方式, 是未来电力工业的重要发展方向。

目前配电网中的新能源主要以分布式方式接

入, 接入 DG 后, 原来单一的由输电网接收、分配电能的系统转变为集电能转化、分配和存储为一体的新型电力系统。对原有配电网而言, 有效地缓解了部分线路的承载限制及线路改造升级, 并降低了电能损耗、减少长线路的投入等。然而, DG 大规模的渗透也会产生一定的负面影响, 具体情况与接入 DG 的位置与容量息息相关。当大量 DG 随机连接或退出配电网时, 会加大系统负荷预测及调度运行的难度, 给配网规划带来不同水平的影响^[1]。因此, 大量 DG 涌入后, 必须重新调整配电网规划, 评估 DG 所带来的影响, 充分发挥其特点和优势, 以保证大电网安全、可靠和经济运行。

含 DG 的配电网规划属多维、动态规划问题, 是典型的非确定多项式 (Non-deterministic Polynomial, NP) 优化问题, 其解法包括启发式算法、数学优化算法和智能优化算法^[2]。前两种算法方法原理简单, 思路直接, 不能有效解决高维配电网规划问题; 智能优化算法通过人工智能或者机器智能解决优化问题, 包含遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)、蚁群优化算法(ACO)、粒子群算法(PSO)、人工鱼群算法(AFSA)、禁忌搜索算法(TS)、人工神经网络(ANN)和进化算法等^[3]。在基本优化算法的基础上, 国内外学者们还提出了各种改进算法, 尽可能使优化过程更快速、准确。吴小刚等提出了一种改进的多目标粒子群优化算法(IMOPSO), 引入交叉变异操作, 采用动态密集距离更新非劣解集以及采用基于优劣解距离法的多属性决策来求解配电网储能系统的选址与定容问题^[4]。夏澍等提出了一种改进多目标微分进化优化算法(IDEMO), 加入混沌搜索策略、动态拥挤距离排序策略与基于熵的权重选取方法, 解决多个目标决策问题^[5]。程彬提出了一种综合自适应的多目标粒子群算法(CAMOPSO), 设定混合储能系统的安装、运维成本最低与风电输出功率合格率最高为目标函数, 应用模糊控制对各储能系统进行功率配置^[6]。陈颖考虑 DG 的随机性, 以最小化网络损耗和最大化延迟升级投资产生的经济效益为多目标函数, 提

出了一种评价配电网接入 DG 的经济效益办法, 利用改进的 PSO 对 DG 的选址与定容进行规划^[7]。曾鸣、杜楠等人建立一种以有功和无功损失指标、系统电压分布指标、MVA 容量指标和短路水平指标最优的系统指标体系模型, 应用 PSO 解决不同单独负荷模型下的 DG 的最佳选址与定容问题^[8]。李文文在考虑了负荷和 DG 的时序特性前提下, 建立以经济性为目的的多目标优化模型, 利用改进自适应 GA 求解配电网的规划问题^[9]。彭显刚等建立了风电、光伏和电动汽车的概率模型, 提出了一种将蒙特卡洛模拟嵌入自适应变异的粒子群算法(AMPSO-MCS)的方法, 把 DG 的随机出力模型转换成确定出力模型, 求解多目标 DG 的最优配置问题^[10]。

通过上述分析可以看到, DG 的选址与定容问题已经取得了丰硕的研究成果, 然而也明显发现, 现有结论大多以经济性作为重要的评价指标, 并且多采用 PSO 进行 DG 的选址与定容。众所周知, 电压稳定性也是重要的指标之一, 关系 DG 是否能顺利并网; PSO 存在易陷入局部最优、收敛精度低、收敛速度慢等缺点。基于此, 本文建立 DG 选址与定容数学模型, 将该模型转换成一个有等式约束条件与不等式约束条件的多目标规划问题, 以引入 DG 后的配网运行总费用最少与电压稳定性改善指标值最佳作为总目标优化求解整个规划问题, 并采用粒子人工鱼群算法(PSOAF)对这一问题进行优化求解, 以某地实际电网为例对模型和算法的可行性进行验证, 得出 DG 的最终优化方案。

1 DG 优化选址

DG 规划包括选址与定容, 不同的安装位置和接入容量的大小对配电网会产生不同程度的影响。目前 DG 规划方法主要是在确定接入位置的前提下对其容量大小进行配置。为了更好地配置 DG, 本节通过两种指标对配电网中的节点进行评价, 整体考虑实际因素约束条件, 确定综合评价价值较小的节点作为 DG 的待选安装位置。

1.1 网损改善率指标

电网损耗的大小主要与电力系统的节点电压和线路电阻有关,合理地引入 DG 能有效地改善系统的电压分布水平,减小系统的网络损耗。定义网损改善指标(Power Loss Improvement Index, PLII)为安装 DG 后与未安装 DG 时的电网损耗之比,该比值可用来反映不同节点引入 DG 后电网损耗的改善效果,评估 DG 的经济效益。节点的网损改善率指标表达式如下^[11]:

$$I_{PLII_i} = \frac{\sum_{j=1}^n P_{loss_j}^{DG}}{\sum_{j=1}^n P_{loss_j}} \quad (1)$$

式中: $P_{loss_j}^{DG}$ 、 P_{loss_j} 分别是节点 i 安装 DG 后与未安装 DG 时电网支路 j 的损耗, n 为配电网中投入运行的线路总数。

1.2 节点电压稳定性改善率指标

对一个具有 m 个节点、 n 条线路的配电网,图 1 是最简单的支路 $i-j$ 拓扑图,潮流方向从点 i 到点 j , 线路阻抗为 $R_{ij} + jX_{ij}$, 点 j 处的负荷为 $P_j + jQ_j$ 。点 i 、 j 处的电压向量直角坐标表示形式分别是 U_i 、 U_j , 支路 j 的电压稳定指标表示为:

$$L_{ij} = \frac{4 \left[(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 + (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) U_i^2 \right]}{U_i^4} \quad (2)$$

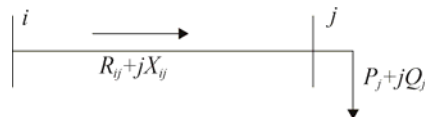


图 1 典型配电网支路
Fig. 1 Typical branch of distribution network

为确保配电网电压稳定,支路 $i-j$ 的电压稳定性指标(2)应当满足 $L_{ij} \leq 1$ 。对于整个配电系统,电压稳定性指标应由全部支路的电压稳定性指标中最大值确定,如(3)所示的配电网节点电压稳定性指标(Voltage Stability Index, VSI),反映了整个配

电系统的电压稳定性情况,该指标值越小,表示配电系统稳定性越高。

$$I_{VSI} = \max \{L_1; L_2; \dots; L_n\} \quad (3)$$

式中, $\{L_1; L_2; \dots; L_n\}$ 是配电系统全部支路的电压稳定性指标集合。

DG 的合理接入可以有效改善系统电压分布水平,保持母线电压在符合规范的范围内。定义电压稳定性改善指标 I_{VSI} (Voltage Stability Improvement Index, VSI)为引入与未引入 DG 前后的配网电压稳定性指标之比,用于评估系统引入 DG 后对配网电压分布水平的影响程度。节点 i 引入 DG 后配网的节点电压稳定性改善率指标 I_{VSI} 的表达式如(4)所示^[12]:

$$I_{VSI_i} = I_{VSI}^{DG_i} / I_{VSI} \quad (4)$$

式中: $I_{VSI}^{DG_i}$ 、 I_{VSI} 分别是节点 i 引入与未引入 DG 时配网的电压稳定性指标。

1.3 节点综合评价指标

综合(1)(4)中的指标 I_{PLII_i} 与 I_{VSI_i} , 可以评估各个节点引入 DG 后配网的网络损耗与节点电压稳定性改善情况。根据两者的重要水平设定相应的权重系数,得出不同需求下的节点总评估指标值,通常选择综合改善率指标较小的点作为 DG 的安装位置,节点 i 的综合评价指标如下式所示:

$$I_{CI_i} = \mu_1 I_{PLII_i} + \mu_2 I_{VSI_i} \quad (5)$$

式中: μ_1 、 μ_2 分别是网络损耗改善率指标和节点电压稳定性改善率指标的权重系数。

2 DG 定容问题

根据各个节点的综合评价指标值(5)以及实际地理环境因素确定各个分布式电源的待选安装节点。在确定接入位置的前提下,对 DG 进行容量大小分配。通过配电网运行综合年费用最小与节点电压稳定性最佳这两个目标函数来确定接入 DG 的容量大小。

2.1 目标函数

(1) 经济性最佳, 即综合年费用最小

经济性目标以 DG 接入后配电网的综合年费用最小为目标, 包括 DG 投资及运行年费用、配电网向输电网的购电年费用、DG 发电政府补贴年费用。其表达式如下^[13]:

$$\min C_{\text{cost}} = C_{\text{DG}} + C_{\text{pp}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{subsidy}} \quad (6)$$

式中: C_{DG} 、 C_{pp} 、 C_{loss} 、 C_{subsidy} 分别表示 DG 接入后 DG 投资及运行年费用、配电网购电年费用、网损费用、DG 发电政府补贴年费用。各项费用的具体表达式如下:

① DG 的投资及年运行费用^[14]

$$C_{\text{DG}} = C_{\text{W}} \cdot N_{\text{W}} + C_{\text{V}} \cdot N_{\text{V}} + C_{\text{B}} \cdot N_{\text{B}}$$

式中: C_{W} 、 C_{V} 、 C_{B} 分别代表了单台风机、光伏、燃料电池的年费用; N_{W} 、 N_{V} 、 N_{B} 依次表示为风机、光伏、燃料电池的安装个数。

对于风力发电机组, 其投资费用主要包含两个部分: 风电机组的建设投资成本 C_{C_W} 和风电设备的运行维护费用 C_{OM_W} , 则单台风电机组年成本为:

$$C_{\text{W}} = \frac{\mu(1+\mu)^{n_{\text{lfe}}}}{(1+\mu)^{n_{\text{lfe}}}-1} \cdot C_{\text{C}_W} + C_{\text{OM}_W} =$$

$$\frac{\mu(1+\mu)^{n_{\text{lfe}}}}{(1+\mu)^{n_{\text{lfe}}}-1} \cdot \frac{c_{\text{w}} P_{\text{r}_W}}{\mu_{\text{W}}} + c_{\text{OM}_W} \cdot \mu_{\text{C}_W} \cdot P_{\text{r}_W} \cdot t_{\text{W}}$$

式中: c_{w} 为单位功率风力机的价格; c_{OM_W} 为单位千瓦时风电设备运行维护费用; n_{lfe} 为风电机组、光伏、燃料电池的运行年限; P_{r_W} 为风力机额定输出功率; t_{W} 为风力机年平均运行小时数; μ 为贴现率; μ_{W} 为风机投资占总投资的比重; μ_{C_W} 为风电机组容量系数。

对于光伏电池, 其投资成本主要包括: 光伏组件的建设成本 C_{C_V} 与光伏组件的运行维护费用 C_{OM_V} , 则单个光伏组件年成本为:

$$C_{\text{V}} = \frac{\mu(1+\mu)^{n_{\text{lfe}}}}{(1+\mu)^{n_{\text{lfe}}}-1} \cdot c_{\text{C}_V} \cdot P_{\text{r}_V} + C_{\text{OM}_V}$$

式中: c_{C_V} 为光伏单位初始投资费用; C_{OM_V} 为光伏组件的年运维费用; P_{r_V} 为光伏电池额定输出功率。

对于燃料电池, 单位燃料电池的成本包括: 燃料电池的建设成本 C_{C_B} 与燃料电池的年运维费用 C_{OM_B} , 其表达式如下:

$$C_{\text{B}} = \frac{\mu(1+\mu)^{n_{\text{lfe}}}}{(1+\mu)^{n_{\text{lfe}}}-1} \cdot c_{\text{C}_B} \cdot P_{\text{r}_B} + C_{\text{OM}_B}$$

式中: c_{C_B} 为燃料电池单位初始建设成本, 包含机组和安装费用; C_{OM_B} 为燃料电池年运行维护费用; P_{r_B} 为燃料电池额定输出功率。

② 配电网购电年费用

$$C_{\text{pp}} =$$

$$8760 \cdot c_{\text{pp}} \cdot \left(\sum_{i=1}^m P_{\text{load}_i} + \sum_{j=1}^n P_{\text{loss}_j} - \sum_{i=1}^m P_{\text{DG}_i} \right)$$

式中: P_{DG_i} 与 P_{load_i} 是节点 i 处 DG 发出的有功功率与负载消耗; P_{loss_j} 为电网支路 j 的损耗; c_{pp} 为配电网单位购电费用。

③ DG 发电政府补贴年费用

$$C_{\text{subsidy}} = -8760 \cdot c_{\text{subsidy}} \cdot \sum_{i=1}^m P_{\text{DG}_i}$$

式中: c_{subsidy} 为 DG 单位发电量的政府补助。

(2) 节点电压稳定性指标最佳, 采用配网第一类电压稳定性指标最小。

$$\min L = \max(L'_1, L'_2, \dots, L'_n)$$

式中: $\{L'_1, L'_2, \dots, L'_n\}$ 为接入 DG 后配网中全部支路电压稳定性指标集合。接入 DG 后的配网电压稳定性通过全部支路的电压稳定性指标的最大值确定, 该指标取的值越小, 则配网稳定性能越高。

(3) 归一化处理

由于经济性(6)与节点电压稳定性指标(5)拥有不一样的量纲, 因此需将二者进行归一化处理, 变为无量纲指标^[15]。归一化后的目标函数如下式所示:

$$f_1 = \frac{C_0 - C_{\text{cost}}}{C_0}, f_2 = \frac{L_0 - L}{L_0}$$

式中: C_0 为未接入 DG 时的配网购电费用; L_0 为未接入 DG 时的节点电压稳定性指标。

把多个目标问题转变成单一目标问题, 优化模型可用式(7)表示:

$$\min(f) = \omega_1 \cdot f_1 + \omega_2 \cdot f_2 \quad (7)$$

式中: ω_1 、 ω_2 分别是接入 DG 后的配网购电费用与电压稳定性指标归一化后的权重系数。

2.2 约束条件

约束条件主要包括:

节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功功率和无功功率; U_i 是节点 i 的电压幅值; j 表示与 i 相连的节点; G_{ij} 和 B_{ij} 分别是节点导纳矩阵的实部和虚部; θ 表示节点 i 、 j 之间的相角差。

节点电压上下限约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (9)$$

式中: $U_{i\min}$ 和 $U_{i\max}$ 分别是节点 i 的电压上下限值。

每个节点安装的 DG 容量约束

$$P_{DGi} \leq P_{Li} \quad (10)$$

式中: P_{DGi} 表示节点 i 安装的 DG 额定功率; P_{Li} 表示节点 i 的负荷功率。为了尽可能小地影响配网的潮流方向, 每个节点安装的 DG 容量应不大于该点的负载量。

DG 总容量约束

$$\sum P_{DG} \leq 0.25 \times \sum P_L \quad (11)$$

根据国标 Q/GDW480-2010《分布式电源接入电网技术规定》, 原则上接入 DG 的总容量不应超过上一级变压器供电区域内的最大负载量的 25%。

3 配电网模型

以某地实际配电系统进行模拟仿真分析, 在原有配电网网架结构的基础上对分布式电源进行规划。该配电系统的电压等级为 35 kV, 总有功负荷 88.6 MW, 总无功负荷 34.3 MVar。假设规划年限为 20 年, 年负荷增长为 9%。该地区风、光资源丰富, 以公式(7)为目标函数、公式(8)~(11)为约束条

件, 应用 PSOAF 进行该地区的配电网规划计算, 采用 Matlab 编程, 验证了本文所提模型和算法的可行性和有效性。

图 2 为实际配电网地理位置的抽象网络图, 根节点 1 视为平衡节点, 设定电压幅值为 37 kV。表 1 为各节点的负荷参数, 表 2 为各支路阻抗参数。

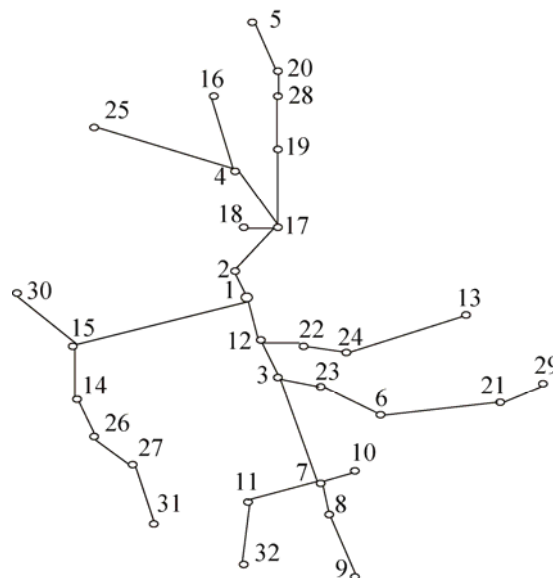


图 2 配电网地理位置结构图

Fig. 2 Geographical location of a distribution network

表 1 节点负荷参数

Tab. 1 Load parameters of nodes

编号	有功负荷 /kW	无功负荷 /kVar	编号	有功负荷 /kW	无功负荷 /kVar
2	1 500	500	18	5 000	2 000
3	2 000	1 000	19	3 000	1 000
4	3 000	1 200	20	1 400	600
5	2 400	900	21	3 200	1 200
6	3 200	1 300	22	2 500	1 000
7	3 000	1 200	23	2 500	900
8	2 000	800	24	4 000	1 200
9	2 000	1 000	25	3 500	1 500
10	1 400	500	26	2 200	1 000
11	2 000	900	27	2 000	800
12	3 000	1 000	28	2 500	1 000
13	4 200	1 700	29	2 000	800
14	3 800	1 600	30	3 000	1 000
15	3 500	1 400	31	4 000	1 500
16	4 300	1 500	32	2 500	1 000
17	4 000	1 300			

表 2 支路阻抗

Tab. 2 Branches' impedance

支路 编号	首端 节点	末端 节点	支路电阻 (Ω)	支路电抗 (Ω)
1	1	2	0.236 9	0.158 7
2	12	3	0.354 9	0.237 7
3	17	4	0.458 1	0.306 9
4	20	5	0.435 8	0.293 8
5	23	6	0.435 8	0.292 0
6	3	7	0.934 2	0.625 8
7	7	8	0.260 0	0.174 2
8	8	9	0.560 9	0.375 7
9	7	10	0.252 0	0.168 8
10	7	11	0.377 1	0.252 6
11	1	12	0.374 2	0.249 5
12	24	13	0.817 2	0.547 5
13	15	14	0.476 2	0.319 0
14	1	15	0.892 4	0.570 3
15	4	16	0.572 4	0.383 5
16	2	17	0.426 3	0.285 6
17	17	18	0.208 2	0.139 5
18	17	19	0.567 5	0.380 2
19	28	20	0.233 2	0.156 2
20	6	21	0.808 1	0.541 4
21	12	22	0.326 4	0.218 6
22	3	23	0.306 3	0.205 2
23	22	24	0.314 8	0.210 9
24	4	25	0.812 4	0.544 2
25	14	26	0.383 0	0.256 6
26	26	27	0.414 7	0.277 8
27	19	28	0.431 7	0.289 2
28	21	29	0.320 3	0.214 6
29	15	30	0.447 6	0.299 8
30	27	31	0.436 6	0.292 5
31	11	32	0.407 4	0.272 9

表 3 各节点指标计算结果

Tab. 3 The calculating results of nodes' indices

节点 编号	网损改善率 指标	电压稳定性 改善率指标	综合评价 指标
1	0.000 0	0.000 0	0.000 0
2	0.991 2	1.000 0	0.995 6
3	0.941 5	0.953 0	0.947 2
4	0.935 4	1.000 0	0.967 7
5	0.937 9	1.000 0	0.969 0
6	0.886 4	0.953 0	0.919 7
7	0.866 6	0.953 0	0.909 8
8	0.903 1	0.953 0	0.928 1
9	0.897 7	0.973 5	0.935 6
10	0.932 5	0.953 0	0.942 7
11	0.899 5	0.957 3	0.928 4
12	0.954 8	1.000 0	0.977 4
13	0.909 4	0.953 0	0.931 2
14	0.933 4	1.000 0	0.966 7
15	0.954 8	1.000 0	0.977 4
16	0.908 0	1.000 0	0.954 0
17	0.935 2	1.000 0	0.967 6
18	0.916 7	1.000 0	0.958 3
19	0.936 1	1.000 0	0.968 1
20	0.961 9	1.000 0	0.980 9
21	0.874 3	0.953 0	0.913 6
22	0.953 3	0.960 1	0.956 7
23	0.921 2	0.953 0	0.937 1
24	0.923 1	0.953 0	0.938 1
25	0.920 0	1.000 0	0.960 0
26	0.951 3	1.000 0	0.975 6
27	0.951 3	1.000 0	0.975 7
28	0.938 3	1.000 0	0.969 2
29	0.913 4	0.953 0	0.933 2
30	0.959 8	1.000 0	0.979 9
31	0.912 5	1.000 0	0.956 3
32	0.878 2	0.953 0	0.915 6

4 含多种分布式电源的配电网规划

4.1 各节点指标计算结果

计算各个节点的网络损耗改善率指标(1)、电压稳定性改善率指标(4)和综合评估指标(5)。通过分析找出 DG 的最优安装节点,减小 DG 选址的搜索空间,提高寻优速度。这里假设两个指标同样重要,即取 $\mu_1 = \mu_2 = 0.5$, 则各个节点的指标值计算结果如表 3 所示。

系统规划安装风电、光伏、燃料电池三种 DG, 根据实际地形、环境因素、自然资源分布等因素, 结合表 3 中各个节点的综合评价指标值, 选择综合评价指标较小的节点作为 DG 的待选安装节点, 例如, 图 2 北部地区空旷, 风力资源丰富, 比较地区节点发现节点 16 和 18 综合评价指标较小, 因此选择 16 和 18 作为风电安装节点。类似可以得到节点 13、24 作为风力机的候选安装节点, 节点 6、7、21 作为光伏组件的候选安装节点, 节点 31、32 作为燃料电池的待选安装节点, 具体如表 4 所示。

表 4 DG 的待选安装节点
Tab. 4 Selected nodes of DG

DG 类型	风电	光伏	燃料电池
候选安装节点	13,16,18,24	6,7,21	31,32

4.2 算法优化规划

4.2.1 PSO 算法优化结果

在待选安装节点的基础上,采用经典的 PSO 算法对目标函数进行优化,经济性、节点电压稳定性

和最优适应度值的优化结果分别如图 3~5 所示。

4.2.2 PSOAF 算法优化结果

采用 PSO 算法进行优化时,尽管可以得到一些优化结果,见图 3~5,然而 PSO 容易陷入局部优化,并且收敛速度有限。基于此,拟采用 PSOAF 优化目标函数,先采用人工鱼群算法对目标范围进行缩小,再采用 PSO 搜索最优值,经济性、节点电压稳定性和最优适应度值的优化结果分别如图 6~8 所示。

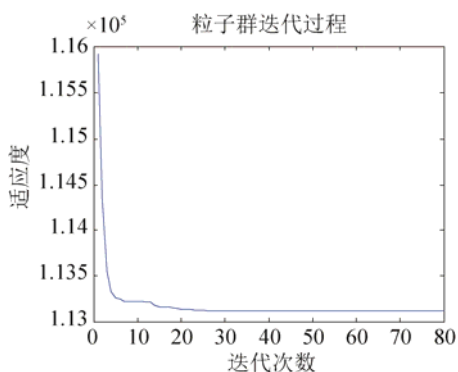


图 3 PSO 优化经济性结果图

Fig.3 Optimized economic result attained by PSO

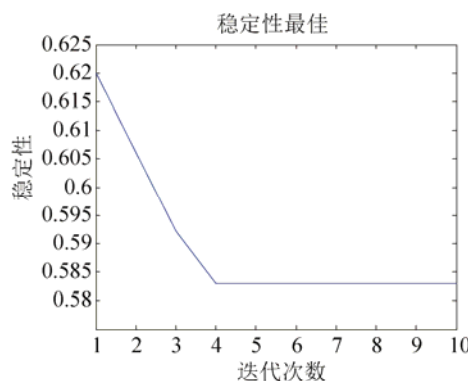


图 4 PSO 优化电压稳定性结果图

Fig. 4 Optimized voltage stability result attained by PSO

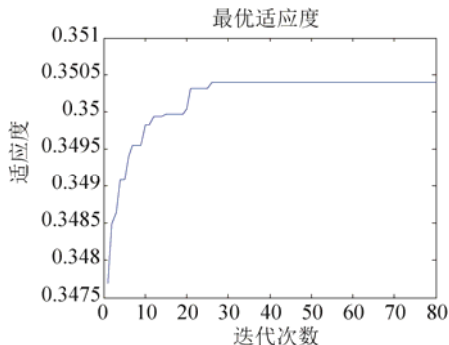


图 5 PSO 最优适应度值

Fig. 5 Most optimized fitness values attained by PSO

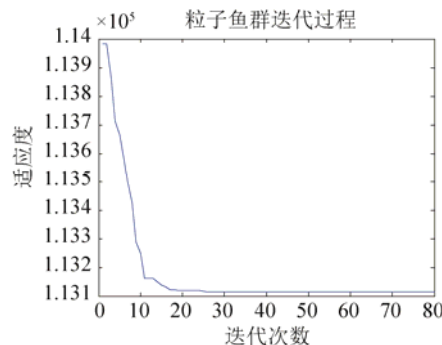


图 6 PSOAF 优化经济性结果图

Fig. 6 Optimized economic result attained by PSOAF

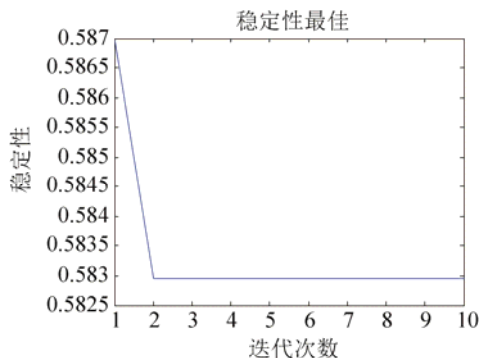


图 7 PSOAF 优化电压稳定性结果图

Fig. 7 Optimized voltage stability result attained by PSOAF

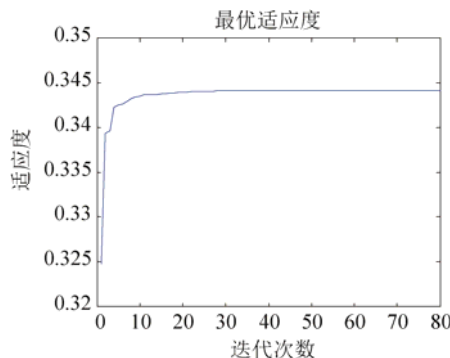


图 8 PSOAF 最优适应度值

Fig. 8 Most optimized fitness values attained by PSOAF

对比图 3~8 可以发现,单纯以经济性作为目标函数时,由图 3 与图 6 可明显看出 PSOAF 收敛速度更快,且得到的适应度值也较小;而同样仅以电压稳定性作为目标函数时,由图 4 与图 7 对比可知,PSO 与 PSOAF 优化得到的适应度值差别不明显,但是 PSOAF 优化时所经历的迭代次数更少;综合考虑两种指标(这里假定经济性与电压稳定性同等重要,选取 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$),通过仿真图 5 和图 8 可以得出,PSOAF 优化可得到更小的适应度值,且收敛速度优于 PSO。通过两种优化算法确定待选安装节点接入 DG 容量如表 5 所示,优化后的经济性指标、电压稳定性指标及最优适应度与未接入 DG 前的各项指标对比如表 6 所示。

表 5 各节点接入 DG 的容量
Tab. 5 Accessible capacity of DG of nodes

节点编号	接入 DG 的容量(MW)	
	PSO	PSOAF
6	0	0
7	8	10
13	18	22.5
14	21	13.5
18	27	27
21	14	15
24	0	0
31	14	14
32	22	22
总容量	124	124

表 6 配电网规划前后费用比较
Tab. 6 The comparison of before and after distribution system planning

各项指标	未安装 DG	安装 DG	
		PSO	PSOAF
配电网购电年费用(万元)	170845.8971	120827.9143	120656.45747
DG 投资及运行年费用(万元)	0	14047.1233	14184.0496
DG 发电补贴年费用(万元)	0	21724.8000	21724.8000
综合年费用(万元)	170845.8971	113150.2376	113115.7071
节点电压稳定性指标	0.97323	0.58296	0.58296
适应度值	0	0.34417	0.3504

由表 6 可知,引入 DG 后配网的综合运行费用与节点电压稳定性改善率指标有了明显的提升,说明合理地配置分布式电源可以给配网的运行带来经济效益和可靠性;同时对比 PSO 和 PSOAF 两种算法的规划结果,可以发现 PSOAF 以相对较少的迭代次数获得了更为精确的最佳规划值。

5 结论

以某地实际配电网系统为例,对 DG 进行合理配置,采用 Matlab 编程仿真分析。以节点综合评价指标与实际地理环境因素结合的方法进行 DG 选址,选择综合评价指标较小的节点作为 DG 的待选安装节点;应用 PSO 算法进行 DG 定容,针对 PSO 算法不足,运用 PSOAF 算法进行求解中,对比经济性目标和最优适应度指标,可以得出 PSOAF 算法规划的效果更好;综合考虑整个配电网,合理接入 DG 可以为配网带来经济效益,也增加了运行可靠性。

参考文献:

- [1] 田佳. 分布式发电对配电网继电保护的影响及对策研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
Tian Jia. Impacts of Distributed Generation on Distribution Network Protection and Countermeasures [D]. Jinan, China: Shandong University, 2010.
- [2] 向万里. 混合群体智能优化算法及应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.
Xiang Wanli. Research on Hybrid Swarm Intelligence Optimization Algorithms with Applications [D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2013.
- [3] 匡芳君. 群智能混合优化算法及其应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
Kuang Fangjun. Hybridized Optimization Algorithms of Swarm Intelligence and Their Application [D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [4] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容 [J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.
Wu Xiaogang, Liu Zongqi, Tian Liting, et al. Energy Storage Device Locating and Sizing for Distribution Network Based on Improved Multi-Objective Particle

- Swarm Optimizer [J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405-3411.
- [5] 夏澍, 周明, 李庚银. 分布式电源选址定容的多目标优化算法 [J]. 电网技术, 2011, 35(9): 115-121.
Xia Shu, Zhou Ming, Li Gengyin. Multi-objective Optimization Algorithm for Distributed Generation Locating and Sizing [J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 115-121.
- [6] 程杉. 含分布式电源的配电网多目标优化问题研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Cheng Shan. Study on Multi-objective Optimization of Distribution Network with Distributed Generation [D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2013.
- [7] 陈颖. 分布式电源接入配电网的选址与定容研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
Chen Yin. Research on Sizing and Locating of Distributed Generation in Distribution Network. Beijing, China: North China Electric Power University, 2013.
- [8] 曾鸣, 杜楠, 张鲲, 等. 不同负荷模型下基于粒子群算法的分布式电源选址和定容优化问题研究 [J]. 华东电力, 2013, 41(3): 497-502.
Zeng Ming, Du Nan, Zhang Kun, et al. Siting and Sizing Optimization for Distributed Power in Different Load Models Based on Particle Swarm Algorithm [J]. East China Electric Power, 2013, 41(3): 497-502.
- [9] 李文文. 配电网中分布式电源的优化配置研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2015.
Li Wenwen. Research on the Optimal Allocation of Distributed Generation in Distribution Network [D]. Jilin, China: Northeast Dianli University.
- [10] 彭显刚, 林利祥, 刘艺, 等. 计及电动汽车和可再生能源不确定因素的多目标分布式电源优化配置 [J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2188-2194.
Peng Xiangang, Lin Lixiang, Liu Yi, et al. Multi-Objective Optimal Allocation of Distributed Generation Considering Uncertainties of Plug-in Electric Vehicles and Renewable Energy Sources [J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2188-2194.
- [11] 郑漳华, 艾芊, 顾承红, 等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 23-28.
Zheng Zhanhua, Ai Qian, Gu Chenghong. Multi-objective Allocation of Distributed Generation Considering Environmental Factor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 23-28.
- [12] Chiradeja P, Ramakumar R. An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion (S0885-8969), 2005, 19(4): 764-773.
- [13] 朱勇, 杨京燕, 张冬清. 基于有功网损最优的分布式电源规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 12-16.
Zhu Yong, Yang Jingyan, Zhang Dongqing. Planning of Distributed Generation Based on Optimal Real Power Losses [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 12-16.
- [14] 刘建. 含分布式电源的配电网规划 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
Liu Jian. Distribution Network Planning Including Distributed Generation [D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [15] 康鲁豫, 朱顺, 刘刚. 考虑电压稳定和网损的分布式电源最优选址和定容 [J]. 电气技术, 2015 (2): 1-5.
Kang Luyu, Zhu Shun, Liu Gang. Optimal Locating and Sizing of Distributed Generator Considering Voltage Stability and Power Losses [J]. Electrical Engineering, 2015 (2):1-5.