

综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究

施泉生¹, 郭良合¹, 张孝君²

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000)

摘要: 分布式电源接入配电网, 会对 DG 投资商、配电网公司及用户等相关主体的经济效益产生影响。从分析 DG 接入配电网对系统网损、电压分布和用户可靠性影响出发, 在潮流计算的基础上, 首先通过计算能反映各节点负荷对系统网损影响程度的指标, 即视在二次精确矩和能反映配电网中母线电压稳定性的指标, 并结合用户的可靠性要求, 先得到 DG 并入电网的候选位置。然后, 分别以 DG 独立投资商单位年投资效益最大和 DG 接入改善电网所得效益最大为目标建立多目标优化函数。模型求解中, 利用改进的非劣排序遗传算法, 通过分段式染色体操作, 实现 DG 类型、位置及接入容量的同时优化。利用能反映用户效益的评价协调函数对算法所得结果做进一步的选择, 使最终所得的结果更科学合理。最后, 利用 IEEE69 节点系统进行仿真算例分析, 验证了所提 DG 优化配置模型和协调规划方法的正确性。

关键词: 分布式电源; 多目标协调优化; 非劣排序遗传算法; 评价协调函数; 多主体的经济效益

Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent

SHI Quansheng¹, GUO Lianghe¹, ZHANG Xiaojun²

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Taian Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Taian 271000, China)

Abstract: The distributed generation (DG) connected to power distribution network affects economic benefits of the distribution network operators (DNOs), DG investors and customers. Firstly, based on the analysis of DG's influence on distribution of voltage, line losses as well as the reliability of nodes, this paper concludes the candidate locations of DG by calculating the index reflecting the influence degree of each node's load on the system losses, i.e. the secondary precise moment and the index that can indicate the bus voltage stability, combined with the user's reliability requirements. Then, multi-objective optimization function is established based on maximum unit yearly benefits of the DG independent investors and the maximum benefits obtained by DG integrating into the improved grid. In solving this model, this paper uses the improved non-inferiority genetic algorithm and segmented chromosome manipulation to achieve the optimization of DG types, location and access capacity simultaneously. The algorithm results is selected further by using coordination function to make the final result obtained more scientific and reasonable. At last, the simulation is conducted on the 69-bus distribution system. The result validates the constructed models and the proposed methods about coordinated plan.

Key words: distributed generation; cooperation of multi-objectives optimization; non-dominated sorting genetic algorithm; evaluation and coordination function; economic benefits of multi-agent

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2016)01-0085-07

0 引言

分布式电源通常是指分布在用户附近的小容量电源, 具有投资小、建设周期短、发电方式可控灵活、环保等优点^[1]。DG 接入配电网, 从技术层面上讲, 可能会对原有电力系统电压、线路损耗以及可靠性等产生影响, 但同时经过合理规划也会对诸多

与之相关的主体带来可观的经济效益。比如, 通过合理投资、经济运行可以增加 DG 独立发电投资商的投资效益; 通过减小网损收益、延缓网络设备升级投资等方面提高电网公司的经济收益等。而对这些相关主体经济效益的影响程度, 与分布式电源的类型、接入位置和容量有很大的关系。所以, 为了提高分布式电源的经济效益, 抑制其负面影响, 需

要对分布式电源类型、位置及接入容量进行合理规划布局^[2]。

目前,关于分布式电源接入配电网的规划的研究已经有了初步的理论研究和实践成果。文献[3]通过所建模型,分析了延缓网络更新成本、损耗成本、购电成本和缺电成本,但这些都是单一的从供电公司角度进行分析。文献[4]以总运行费用最小为目标函数建立了分布式电源规划的优化模型,但在建模分析求解过程中未考虑 DG 接入对系统运行带来的影响。文献[5]用改进的自适应权重粒子群算法进行目标函数寻优,最后得到了有功网损最小的分布式电源接入方案。文献[6]建立了考虑线损、可靠性和电压改善的 DG 规划的多目标模型,但优化求解的过程中,将多目标模型转化为单目标处理,这样不能独立地研究分析各子目标的作用,存在加权求解的盲目性。

通过对比分析已有的关于分布式电源规划的研究发现:(1)为了减少规划问题的维数,简化计算,通常可以先对 DG 的接入位置根据相关的技术、经济要求进行初步的选择。但在考虑 DG 接入对配电网的影响的基础上,对分布式电源候选位置的确定中,进行确定的依据不够全面。如文献[7]仅仅通过电压稳定性指标量化了各节点负荷对电压分布的影响。而本文在相关约束条件下,提出一种实用的考虑全面的科学的确定 DG 候选位置解集的方法,不仅可以提高运算效率,还能提高结果的准确性。(2)已有的研究中,建模主要是从单方面主体考虑的,要么是单纯地从配电公司的效益考虑,要么是单纯地从 DG 独立投资商或用户的经济效益考虑,但随着电网改革的推行以及分布式电源投资成本的下降和国家政策、法规的支持,会有越来越多的相关企业主体参与其中,所以如何协调各主体之间的经济利益,为投资决策者提供可靠的科学决策,已成为一个亟需解决的问题。

分布式电源的接入会对系统网损和系统电压分布产生影响,在潮流计算的基础上,本文从计算反映其影响程度的一类指标开始,并对结果进行排序,综合分析了 DG 接入对配电网电压分布、系统线损以及用户可靠性的影响,最后确定出分布式电源的候选位置解集。然后,分别建立分布式电源独立投资商年投资效益最大和因分布式电源接入而增加电网公司收益最大化的多目标模型,并用改进的非劣排序遗传算法(NSGA-2),以分布式电源的类型、位置及接入容量为决策变量,实现 DG 的合理规划。最后,在优化的所得结果中,根据能反映用户经济效益的评价协调函数,对所得结果做进一步选择,

以使 DG 规划更科学合理,能更好地为决策者提供决策依据。最后,选用 IEEE69 节点配电网系统进行算例仿真分析。

1 DG 候选位置的确定

1.1 以改善节点电压为目的进行选择

分布式电源的接入,使传统配电网由辐射状结构衍变成具有多个分散电源的结构,线路中的潮流的方向和大小都会有一定的变化,从而也会对配电网中的电压分布产生影响。经研究表明,合理配置分布式电源的接入点,将分布式电源优先接入电压稳定性薄弱的节点,可以有效地改善电压稳定性分布。鉴于此,以改善节点电压为目的,本文引用文献[7]计算配电网中所有母线的电压稳定指标的公式,在潮流计算的基础上,通过科学计算并具有一定针对性地选取 DG 的接入位置。电压稳定性指标的计算公式如式(1),其中,配电网典型支路示意图如图 1 所示。

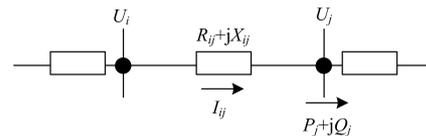


图 1 配电网典型支路示意图

Fig. 1 A typical branch of distribution network

$$S_j = U_i^4 - 4(P_j R_{ij} + Q_j X_{ij})U_i^2 - 4(P_j X_{ij} + Q_j R_{ij})^2 \quad (1)$$

这里, S_j 被定义为母线 j 的电压稳定度指标。

一般情况下,配电网正常运行时, $S_j \geq 0$, 经研究分析可知,其值越大,母线处的电压稳定度越好;该值越小,该处的电压稳定度越小;当该值接近于 0 时,系统电压崩溃。

因此,可以先对配电网中各个节点所对应的该指标进行计算分析。然后按照从小到大的顺序进行排序比较。最后,优先选择电压稳定度指标较小的母线节点作为 DG 的候选接入点。

1.2 以各负荷节点对网损的影响程度进行选择

用负荷视在二次精确矩^[8]之和来表示系统网损,即

$$T_s^2(i) = R_{di} \left[\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} - \sum_{s \in i} \frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right] \quad (2)$$

式中: R_{di} 为节点 i 到源节点的电气距离; P_{bi} 、 Q_{bi} 分别为流入节点 i 的有功功率和无功功率; P_{bs} 、 Q_{bs} 分别为流入节点 s 的有功功率和无功功率; 指标 $T_s^2(i)$ 的大小能够反映流入节点的有功和无功功率对该节点有功网损的影响程度。通过此指标可以确

定各负荷点对网损的影响程度, 而且 $T_s^2(i)$ 的大小与各负荷点对网损的影响程度成正相关。

综上所述, 本文是在满足地理位置、自然资源的条件下, 通过三步来确定分布式电源的候选位置:

①计算电压稳定性指标 S_j , 并按照由小到大的顺序排序, 选择取值较小的节点。②计算视在二次精确矩 $T_s^2(i)$ 并按由大到小的顺序排序, 优先选择取值较大的节点。③结合配电网内各节点的等级负荷要求, 选取可靠性要求较高的节点作为候选节点。最后, 再对以上三步所得的候选节点进行整合。但在整合互并的过程中, 还要兼顾到分布式电源接入对邻近负荷节点的影响以及其布局不应过度集中的原则。

2 分布式电源的选址及定容的多目标优化模型

2.1 目标函数

随着电力市场化的改革, 分布式电源的投资商也变得越来越多, 它往往与接入的配电网经营者以及相应的电力用户都隶属于不同的利益群体。对于分布式电源投资商来说, 总是希望得到最大的投资收益; 对于配电网的经营者, 则是希望接入配电网的分布式电源尽量发挥积极作用, 减少负面影响; 而对于用户而言, 则一直是希望保证得到可靠的供电质量, 减少停电损失。所以, 本文通过分别建立独立发电商的投资利益最大化 ($\max C_{YC}$) 和因分布式电源接入改善电网公司经济效益最大化 ($\max \Sigma C_{DW}$) 为目标的多目标函数, 来评价 DG 独立投资商效益和改善电网所得收益。

2.1.1 子目标函数 1

把独立投资商的年投资效益定义为子目标函数 f_1 , 模型的分析计算如下:

$$\text{子目标函数 1: } f_1 = \max C_{YC} \quad (3)$$

通过分布式电源的单位年投资效益来反映独立发电商的收益。分布式电源的投资效益是指单位分布式电源的投资所获得的年收益, 即

$$C_{YC} = \frac{C_{YO}}{C_{YI}} \quad (4)$$

式中: C_{YC} 为折算到每年的年收益; C_{YI} 为折算到每年的投资成本, C_{YI} 是分布式电源的购买、安装费用和运行维护费用(和燃料费用)之和; C_{YO} 由两部分组成, 一部分是分布式电源卖电所得收益, 另一部分是由于改善环境或使用可再生能源而得到的国家政策性补贴。相应的数学模型如下:

$$C_{YO} = 8760 \sum_{i=1}^N (C_{SPi} + C_{BPi}) S_i^{\text{set}} \partial_i \quad (5)$$

$$C_{YI} = 8760 \sum_{i=1}^N C_{OPi} S_i^{\text{set}} \partial_i + \sum_{i=1}^N \theta_{DGi} S_i^{\text{set}} C_i^{\text{fixed}} \quad (6)$$

式中: C_{SPi} 、 C_{BPi} 分别为节点 i 处分布式电源的上网电价和政策性补贴电价; N 为接入分布式电源的节点总数; θ_{DGi} 是分布式电源固定投资年费用折算系数; S_i^{set} 为节点 i 处分布式电源的额定安装容量; C_i^{fixed} 为节点 i 处分布式电源的单位投资成本; C_{OPi} 为分布式电源的单位电量运行维护费用和燃料费用; ∂_i 为节点 i 处分布式电源的容量系数。

2.1.2 子目标函数 2

把因分布式电源接入改善电网公司的经济效益定义为目标函数 f_2 , 模型计算分析如下:

$$\text{子目标函数 2: } f_2 = \max \Sigma C_{DW} \quad (7)$$

分布式电源经合理规划接入配电网后, 可以减少系统网损、改善系统电压质量、提高系统可靠性、延缓网络更新成本等。本文在衡量计算因分布式电源接入电网改善电网公司收益时, 通过分别建立减少系统网损收益 (ΔC_{Ploss})、提高电压稳定性收益 (ΔC_U)、延缓网络更新成本 (ΔC_{renew}) 的相关计算模型, 来表示电网公司得到改善所得的收益, 表示为

$$\Sigma C_{DW} = \Delta C_{Ploss} + \Delta C_U + \Delta C_{renew} \quad (8)$$

1) 减少线损收益

分布式电源的合理接入能够减少电网的线路损耗。减少的线损收益主要与网损降低量和市场电价有关。网损降低量即电网损耗是指没有安装分布式电源时的电网损耗与安装分布式电源后的电网损耗之差。计算模型为

$$\Delta C_{Ploss} = 8760 C_{gc} (P_{loss1} - P_{loss2}) \quad (9)$$

式中: C_{gc} 为配电公司单位销售电价; P_{loss1} 、 P_{loss2} 分别为分布式电源接入前后电网的线路损耗功率。

2) 延缓配电网投资收益

随着负荷的增长, 电网企业为满足负荷要求, 需要定期定量地增加网络更新投资。而分布式电源的引入, 既能满足新增负荷的要求, 也能延缓网络的更新成本投资。延缓网络投资收益的计算模型如式(10)所示。

$$\Delta C_{renew} = \sqrt{3} C_{mnew} U_{av} \sum_{i=1}^{N_i} (I_{wi} - I_{woi}) \quad (10)$$

式中: C_{mnew} 为折算到每年单位容量的更新费用成本; I_{wi} 和 I_{woi} 为安装分布式电源前后流过相应支路的电流; U_{av} 为平均额定电压。

3) 提高电压稳定性收益

分布式电源的合理接入, 能够改善配电网的电

压分布, 而电网企业每年会由于改善系统的电压分布, 提高用户的电压质量而获得部分收益, 本文把这部分收益称为提高电压稳定性收益(ΔC_U), 其计算模型为

$$\Delta C_U = C_U \left(\frac{\delta_{wi}}{\delta_{woi}} - 1 \right) \quad (11)$$

其中

$$\delta = \sum_{i=1}^N U_i L_i k_i \quad (12)$$

式中: C_U 为电网公司保证用户电压质量而获得的单位年收益; δ_{wi} 和 δ_{woi} 分别为有无 DG 时系统年平均电压指标; δ 为系统年平均电压指标(注: δ_{wi} 和 δ_{woi} 根据 δ 来计算); k_i 为根据节点负荷的重要程度设定的权重因子; U_i 和 L_i 分别为各节点的电压幅值和节点负荷。

2.2 约束条件

1) 节点电压约束

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}, i \in \Omega \quad (13)$$

式中: V_{\max} 、 V_{\min} 分别是节点 i 的电压上下限; Ω 为配电网所有节点的集合。

2) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \zeta_{ij} + B_{ij} \sin \zeta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \zeta_{ij} - B_{ij} \cos \zeta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别为节点 i 处电源的有功和无功功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 处负荷的有功和无功功率; G_{ij} 和 B_{ij} 为系统导纳; ζ_{ij} 为节点电压相角差。

3) DG 最大安装位置个数约束

$$N_k \leq N_{\max} \quad (15)$$

式中: N_k 为实际安装的 DG 个数; N_{\max} 为配电网允许安装的最大位置个数。

4) 分布式电源的容量约束

$$\sum_{i \in \Omega_g} P_{DGi} \leq k P_{\Omega} \quad (16)$$

式中: k 为渗透率; Ω_g 为安装分布式电源节点的集合; P_{Ω} 为配电网的总负荷。

3 分布式电源的多目标规划的方法

3.1 求解方法 NSGA-2

本文采用带精英策略和拥挤距离原理的非劣性遗传算法(NSGA-2), 与传统的遗传算法相比, 它对种群成员是根据锦标赛的规则进行遗传和依据拥

挤距离进行排序, 形成新的种群, 反复进行, 最后在算法终止条件的约束下产生最优解。算法具体描述参见文献[9-10]。

本文是关于具有 3 个决策变量(DG 类型、位置及容量)的多参数编码的遗传算法求解。先将 3 个变量分别执行遗传操作, 最后将 3 个子串连成一个完整的染色体。针对本文, 在综合考虑 DG 独立投资商的年投资效益和因 DG 接入改善电网收益两个目标的情况下, 利用此方法可得到部分无偏最优解。

3.2 评价协调函数 f_3

本文中对于利用非劣排序遗传算法, 在综合考虑目标函数 f_1 、 f_2 的情况下, 可得到部分合乎题意的无偏最优解。但所得的无偏最优解对应的规划方案, 对某些节点对应用户的可靠性效益影响程度是不同的, 所以根据用户的可靠性效益这个指标, 可以对部分无偏最优解作出进一步的选择, 以得到更合适的 DG 规划方案。本文把能反映用户可靠性经济效益的指标定义为评价协调函数。

以下是求解评价协调函数 f_3 的相关分析及模型求解。

DG 并网后, 合理运行可以提高配电网供电可靠性。当电网发生停电事故时, DG 仍能正常运行, 规避用户的停电损失。此处用户效益仅考虑因 DG 接入, 一般用户或特殊用户规避停电损失的可靠性效益, 其计算模型如下:

$$\text{评价协调函数: } f_3 = C_{\text{of}} \quad (17)$$

在同一地区, 电价倍数相对稳定, 故本文采用电价倍数法计算用户停电损失, DG 并网可以减少停电损失费用的计算模型为

$$C_{\text{of}} = \sum_{i=1}^n \gamma_i P_{\text{DG}i} \times b \times c_i \times k_i \cdot t \quad (18)$$

式中: 节点 i 处有 DG 时则 γ_i 为 1, 否则, γ_i 为 0; n 为配电网节点总数; b 为电价倍数; c_i 为节点 i 处的销售电价; k_i 为节点 i 处 DG 的容量系数; t 为年平均停电时间。

本文算法的流程图如图 2 所示。

4 算例分析

4.1 基本数据

本文采用 IEEE69 节点系统来进行验证。

1) IEEE69 节点系统

其拓扑结构如图 3 所示, 系统的节点负荷及线路参数引用文献[11]。

2) 遗传操作参数及其他仿真参数

① 种群规模为 100, 迭代次数为 50, 交叉概率

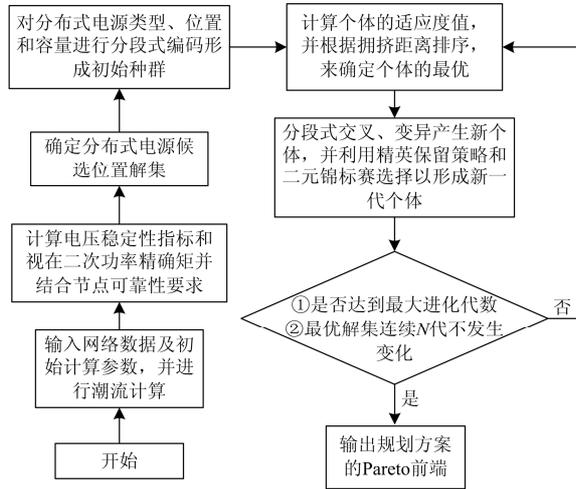


图 2 遗传算法流程图

Fig. 2 Flow diagram of genetic algorithms

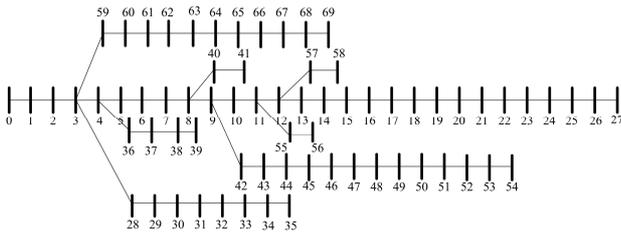


图 3 IEEE69 节点系统拓扑图

Fig. 3 69 nodes distribution system

为 $P_c=0.9$, 变异概率为 $P_m = 0.1$ 。

② 电网中最大渗透率不超过配电网所有负荷的 30%(即 k 为 30%); 节点电压运行的上下限为+7%和-7%; 允许的最大安装位置个数为 4 个。

③ 延缓网络更新的单位成本 C_{mnew} 为 1 元, C_U 为 1 万元(升高)和-5 万元(降低); 为简化计算, 把配电网中各节点处的销售电价等同于全网的平均销售电价, 即 C_r 、 C_{gc} 均为 0.53 元/kWh。

④ 计算停电损失时, 用到的电价倍数 b 为 25^[12], 一般用户和可靠性要求高的用户的年平均停电时间 t 分别为 17 h 和 2 h^[13]。

3) 候选 DG 的相关参数见附录 A。

4.2 优化结果

在未安装分布式电源的情况下, 从改善电压分布的角度, 在潮流计算的基础上, 通过计算电压稳定性指标获得的候选位置解集为: {3, 9, 26, 27; 34, 35; 52, 54; 38, 39}; 计算无功二次精确矩得到的候选位置解集为 {50, 48, 46; 9, 8, 12; 7, 16, 18; 4, 38, 37}; 本文利用假设的方法, 把 {39, 54, 56} 设定为供电可靠性要求较高的点; 最后根据

上面已阐述的候选位置的确定办法进行合并归类可得分布式电源候选位置解集为: {3, 4, 5; 37, 38, 39; 20, 24, 25, 26, 27; 12, 16, 17, 18; 56; 46, 48, 50, 53, 54}。

根据以上论述, 得出候选位置的解集后, 利用本文模型和 NASA-2 遗传算法, 迭代 50 次后, 可以得到 Pareto 最优前端图像如图 4 所示。

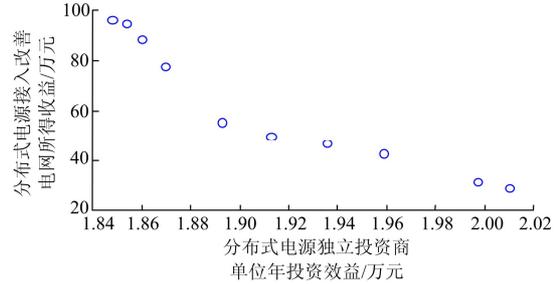


图 4 Pareto 解空间的分布

Fig. 4 Distribution of the solution space for Pareto

在综合考虑两个目标函数 f_1 、 f_2 所代表相应主体经济效益的情况下, 利用折中法由图 4 可得相应的部分无偏最优解如表 1 所示; 同时, 由计算可得, 改善电网公司收益(f_2)及其子函数数值如表 2 所示。

表 1 部分无偏最优解

Table 1 A set of Pareto-optimal solutions

序号	DG 接入位置	DG 接入的类型	DG 接入容量/kVA	f_1	f_2	f_3
1	16, 20, 54	T1, T1, T1	300, 400, 100	1.89	55.16	1.43
2	17, 20, 54	T1, T1, T1	400, 300, 200	1.91	49.88	2.22
3	16, 20, 54	T1, T1, T1	200, 100, 200	1.93	46.68	1.85

注: f_1 、 f_2 、 f_3 单位为万元·a⁻¹

表 2 f_2 及其子函数数值

Table 2 Solutions of f_2 and its subfunction

序号	f_2	ΔC_{Ploss}	ΔC_{renew}	ΔC_U
1	55.16	23.07	30.61	1.48
2	49.88	22.64	25.67	1.57
3	46.68	18.97	26.35	1.36

注: 单位为万元·a⁻¹

如表 1、表 2 中所示, 序号 1、2、3 分别对应三种方案, 分析表 1、表 2 中的数据可知: ① 改善电网公司的收益(f_2)的值均大于 0, 它分别包括因 DG 接入减少的网损收益、延缓网络投资收益和改善电压稳定性收益^[14], 由表 2 中的数据可知, 三者对应的结果也均大于 0。由此可知, DG 的接入确实改善了系统网损和电压分布, 进而改善了其经济效

益,佐证了本文所利用的算法的有效性。②在某种程度上,这三种方案都能达到协调平衡分布式电源独立投资商和电网公司之间的经济效益的目的^[15]。但是,在考虑用户经济效益的情况下,由代表用户效益的评价函数 f_3 的大小可知,决策者应优先选择序号2对应的DG规划方案,因为按照序号2对应的方案,减少用户的停电损失值最大,间接地增加了用户的经济效益^[16]。

同时,仿真结果表明,在Matlab中运行,程序进行到15代左右时,Pareto最优前端对应的个体数已基本稳定,表明此算法的收敛速度还是比较快的。由图示结果可看出两点:①一是Pareto最优前端中,分布式电源的类型大都是T1(光伏类)。出现这样的结果主要有两点原因,一是相比于其他类型的分布式电源,其投资运行维护成本偏低;二是因为其上网电价较高,并有一定的政策性补贴。②随着分布式电源类型、位置和接入容量的变化,代表独立投资商投资效益和电网公司经济效益的两个目标函数值都会发生变化。而且,正如我们所知道的,在多目标优化过程中,是很难同时使两个目标同时达到最优的。鉴于此,在分布式电源的实际应用中,应从Pareto解集中做如下选择:若以促进分布式电源发展并得到广泛应用为目的,应从分布式电源投资的单位成本收益较大的方案中选择(如图4中左上部分点所对应的方案);若以改善电网所得的收

益,增加电网公司对分布式电源并网的欢迎程度为目标,应从改善电网所得收益较大的方案中选择(如图4中右下部分点对应的方案)。如果两个目标没有特别的侧重,可在参考用户效益的情况下对所得的无偏最优解作进一步选择,以使分布式电源并网的经济效益值更大^[17]。

5 结语

分布式电源在配电网中的综合运用,不但提高了配电网的可靠性,而且经过合理规划后的DG接入配电网也可带来巨大的经济效益。本文首先以改善节点电压和改善系统网损为目的,确定出DG接入的候选位置解集,同时考虑了某些节点对应的可靠性要求。候选位置的确定既减少了计算纬度,也提高了计算效率。然后,针对本文所建的多目标函数模型,利用改进的非劣遗传算法较好地实现了分布式电源类型、位置和容量的同时优化。仿真结果表明,在一定程度上,本方法可以有效地协调多主体之间的利益分配关系;同时在对于分布式电源独立投资商和电网公司之间的经济利益没有特别的侧重时,本文提出的用户效益指标可以更科学地指导并确定分布式电源的规划方案;而且,本文利用DG规划的多目标算法还很好地避免了对多目标函数进行加权求解的盲目性^[18];同时,本文可为分布式电源的独立投资商以及电网公司允许分布式电源并网的位置和容量提供参考依据。

附录 A

表 A 分布式电源的相关参数
Table A Relevant parameters of distribution generators

分布式电源 类型	单机组安装 容量/kW	投资成本/ (万元·kW ⁻¹)	运行维护成本/ (元·(kWh) ⁻¹)	容量系数 ∂_i	年费用折算 系数 θ_{DG_i}	上网电价/元	补贴电价/元
DG1	100	1.20	0.032	0.35	0.100 6	0.55	0.25
DG2	44	4.58	0.013	0.29	0.084 3	0.55	0.25
DG3	200	1.76	0.320	1.00	0.100 6	0.35	0
DG4	60	0.99	0.195	1.00	0.100 6	0.35	0

参考文献

[1] 曹智平,周力行,张艳萍,等.基于供电可靠性的微电网规划[J].电力系统保护与控制,2015,43(14):10-15.
CAO Zhiping, ZHOU Lixing, ZHANG Yanping, et al. Micro-grid planning based on supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.

[2] 王成山,陈恺,谢莹华,等.配电网扩展规划中分布式电源的选址与定容[J].电力系统自动化,2006,30(3):38-43.

WANG Chengshan, CHEN Kai, XIE Yinghua, et al. Siting and sizing of distribution generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.

[3] CELLI G, GHIANI E, MOCCI E, et al. A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and sitting of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 750-757.

[4] EI-KHATTAMW, HEGAZY Y, SALAMA M. An

- integrated distributed generation optimization model for distribution system planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1158-1165.
- [5] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [6] CARMEN L T B, DJALMA M F. Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28: 413-420.
- [7] 陈颖. 分布式电源接入配电网的选址定容研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [8] 矫志宏, 蔡中勤, 郭志忠. 辐射型配电网无功补偿的精确矩法[J]. 继电器, 2002, 30(9): 11-14.
JIAO Zhihong, CAI Zhongqin, GUO Zhizhong. Accurate moment method for optimization of capacitors in radial distribution systems[J]. Relay, 2002, 30(9): 11-14.
- [9] 雷德明, 严新平. 多目标智能优化算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] 王洪涛, 刘玉田. 基于 NSGA-II 的多目标输电网架最优重构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 14-18.
WANG Hongtao, LIU Yutian. Multi-objective optimization of power system reconstruction based on NSGA-II[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 14-18.
- [11] MESUT E, BARAF, WU F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.
- [12] ZANGIABADIA M, FEUILLETA R, LESANIB H, et al. Assessing the performance and benefits of customer distributed generation developers under uncertainties[J]. Energy, 2011, 36(3): 1703-1712.
- [13] 李晶. 配电系统的停电损失及其评估方法[J]. 农业科技与装备, 2008(5): 38-40.
LI Jing. Power off loss in distribution system and its estimation methods[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2008(5): 38-40.
- [14] 胡吟, 韦钢, 言大伟, 等. 分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 100-105.
HU Yin, WEI Gang, YAN Dawei, et al. Optimization allocation of distributed generations embedded in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 100-105.
- [15] 曾鸣, 田廓, 李娜, 等. 分布式发电经济效益分析及其评估模型[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 129-133.
ZENG Ming, TIAN Kuo, LI Na, et al. Economic benefits analysis of distributed generation and its assessment model[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 129-133.
- [16] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 1-7.
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 1-7.
- [17] 钟嘉庆, 叶洽格, 卢志刚. 分布式发电注入容量与接入位置的优化配置分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 50-55.
ZHONG Jiaqing, YE Zhige, LU Zhigang. Analysis of optimal allocation of penetration level and interconnected location of DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 50-55.
- [18] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.

收稿日期: 2015-03-20; 修回日期: 2015-05-25

作者简介:

施泉生(1961-), 男, 教授, 从事电力经济与管理科学的研究工作; E-mail: shiqs@126.com

郭良合(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源并网经济效益研究。E-mail: lianghexueshu@163.com

张孝君(1988-), 男, 助理工程师, 技师, 从事电网运行技术研究工作。

(编辑 魏小丽)