

Siting and Sizing of Distributed Generation in Micro-Grid

Xiangyang Zhao¹, Xingxuan Wang^{1,2*}, Yunfeng Feng², Xuanzi Chen¹

¹School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing

²Jiangxi ENACS Renewable Energy Resources and Micro Grid Innovations Co. LTD, Ji'an Jiangxi

Email: *kaileichen@163.com, zhaoxiangyang@buaa.edu.cn

Received: Jun. 7th, 2015; accepted: Jun. 26th, 2015; published: Jun. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Siting and sizing of Distributed Generation (DG) is an important research topic in micro-grids development. Firstly, we introduce the power flow method based on back/forward sweep and the static voltage stability index in micro-grid. Then, based on the voltage level of DG access each series and parallel branch, we optimize the DG layout. Simultaneously, taking into account the degree of improvement in power losses and static voltage stability these two important indicators, we optimize DG capacity, using particle swarm optimization (PSO) with inertia weight to solve this problem. Finally, an example simulation results show that this method can effectively improve the voltage level, reduce active power loss, improve static voltage stability of micro-girds, and has some practical value in DG planning stage of siting and sizing.

Keywords

Distributed Generation, Siting and Sizing, Power Losses, Static Voltage Stability

微电网分布式电源的选址和定容

赵向阳¹, 王杏玄^{1,2*}, 冯云峰², 陈眩姿¹

¹北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京

²江西仪能新能源微电网协同创新有限公司, 江西 吉安

Email: *kaileichen@163.com, zhaoxiangyang@buaa.edu.cn

*通讯作者。

收稿日期：2015年6月7日；录用日期：2015年6月26日；发布日期：2015年6月30日

摘要

分布式电源(Distributed Generation, DG)的选址定容问题是微电网发展中的一个重要研究课题。首先介绍了基于前推回代法的微电网潮流计算,给出了微电网的静态电压稳定指标。然后,在DG接入对各串并联支路电压水平影响的基础上,优选DG布局。同时考虑了网损改善程度及静态电压稳定性改善程度这两个重要指标,来优化DG的容量,并采用带惯性权重的粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)求解。最后通过算例仿真分析,结果表明采用该方法能有效提高系统的电压水平,降低有功网损,同时提高系统的静态电压稳定性,在分布式电源选址定容的规划阶段具有一定的实用价值。

关键词

分布式电源, 选址定容, 网损, 静态电压稳定性

1. 引言

分布式电源以其环保、高效等优点成为电力行业的研究热点[1] [2]。分布式电源是指发电功率在数千瓦至 50 MW (兆瓦)的小型化、模块化、分散在用户附近、与环境兼容友好的独立电源,主要特点是其靠近用户负荷,可实现直接供电或热电联产,同时可减少输配电线路的网络损耗,减轻由于负荷增长造成的输配电设备扩建压力。随着 DG 发电及并网技术的日益提高,一些 DG 在技术上和经济上的优势不断凸显,加之电力市场发展完善及国家相关支持 DG 发展政策的出台,分布式发电将成为 21 世纪重要的能源选择[3]。

分布式电源的接入会对微电网节点电压、线路潮流、系统静态电压稳定性、供电可靠性等都有影响。位置和容量不合理的 DG 分布,不仅会增加网损,降低供电可靠性,还会降低系统的静态电压稳定水平。为此,合理有效地选择微电网中 DG 的接入位置和容量十分重要。一些国内外学者对该问题进行了研究。文献[4]建立了计及环境效益的分布式发电优化规划模型,并采用粒子群算法求解。文献[5]采用概率搜索算法,同时考虑了冷热电联供,以配电网系统的可靠性指标最高为目标函数,优化 DG 的位置和容量。文献[6]在 DG 个数、位置、容量均不确定的情况下,采用自适应权重粒子群算法,以网络损耗最小为目标,对 DG 进行优化配置。文献[7]在限制 DG 接入总量和考虑多约束条件的基础上,建立了以网络年运行费用最小为目标的规划模型,采用新型的免疫遗传算法(IGA)进行求解。上述文献多以某一或某几个指标为优化目标,并考虑了相应的约束条件来优化微电网中 DG 的布局,但很少考虑系统的静态电压稳定性。

为有效降低微电网的网损,提高微电网的静态电压稳定性,本文在基于各串并联支路电压水平的 DG 选址方法基础上,建立了综合考虑微电网有功网损及静态电压稳定指标的 DG 定容模型,并采用带惯性权重的粒子群优化算法对算例进行仿真分析。

2. 微电网潮流计算

本文将微电网中的分布式电源处理为功率因数恒定不变的 PQ 节点。由于分布式电源一般靠近负荷中心,本文假定分布式电源直接安装于负荷节点。

传统配电网多是辐射型结构,前推回代法因其线性收敛性好、计算速度快,是目前应用最广泛、最

成熟的潮流算法之一。本文采用前推回代法进行微电网潮流计算。对于 PQ 节点类型的 DG，首先计算其节点注入电流，然后前推各支路电流，更新回代各节点电压和功率分布，直至满足潮流收敛准则[8]。

3. 微电网系统的静态电压指标

电力系统的电压稳定性是指系统维持电压稳定的能力。在高峰负荷期间一个较短暂的出乎意料的高水平负荷都有可能威胁到系统的电压稳定性。位置和容量不合理的 DG 可能导致系统某些薄弱母线失稳，继而引起电压崩溃事故。在 DG 规划阶段，应该考虑不同负荷水平的影响，因此建立以系统静态电压稳定指标为最佳的规划模型，可提高系统运行稳定性及承受负荷增长的能力[9]。

静态电压稳定指标 L 计算如下：

图 1 所示为简单配电网典型支路， $R + jX$ 为线路阻抗， \dot{I} 为支路电流； P_j 、 Q_j 分别为末端母线 j 的有功功率和无功功率； \dot{U}_i 、 \dot{U}_j 分别为始末端母线电压。

根据图 1 中的电路，有：

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{R_{ij} + jX_{ij}} \quad (1)$$

$$S_j^* = P_j - jQ_j = \dot{U}_j^* \dot{I} \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得：

$$U_j^4 - (U_i^2 - 2P_j R_{ij} - 2Q_j X_{ij}) U_j^2 + (P_j^2 + Q_j^2)(R_{ij}^2 + X_{ij}^2) = 0 \quad (3)$$

依据方程有实数解，化简可得：

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

因而可以定义静态电压稳定指标为：

$$L_{ij} = \frac{4}{U_i^4} \left[(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 + (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) U_i^2 \right] \quad (5)$$

则：

$$L_{ij} \leq 1 \quad (6)$$

整个系统的静态电压稳定指标 L 定义为所有支路静态电压稳定指标中的最大者，即

$$L = \max \{L_1, L_2, \dots, L_B\} \quad (7)$$

式(7)中， B 为系统支路数。

与 L 对应的支路称为系统最薄弱支路，当系统稳定时，式(4)满足，则最薄弱支路对应的 L 值一定大于 0 且小于 1.0。当系统发生电压崩溃时，一定是从最薄弱支路开始的。静态电压稳定指标 L 越小，系统电压水平越稳定，即系统能够承受更大的负荷增长。当 $L = 1.0$ 时，系统处于临界崩溃状态。

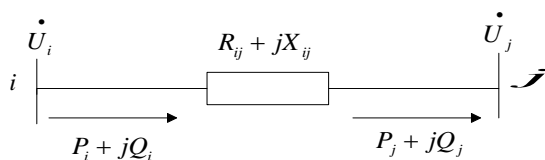


Figure 1. Typical branch of a simple distribution network
图 1. 简单配电网典型支路

4. 分布式电源的选址和定容

4.1. DG 安装位置优选原则

首先, 分布式电源安装位置的选择要满足相应自然资源、地理位置及国家相关能源方针政策。此外, 通常没有接入分布式电源时, 越靠近馈线末端节点电压越低。当微电网中接入 DG 后, 如果 DG 不从电网吸收无功, 则全网的电压均得以提升; 相同渗透率的 DG, 散布在馈线上比集中在同一位置对电压的支撑作用大; DG 位置越靠近馈线末端、接入比例越大对系统电压的提升作用越明显, 且 DG 对接入点及其附近系统的电压影响较大。所以, 需要分析在 DG 接入前系统的节点电压分布特性。

综上, 确定 DG 安装位置的优选原则:

- 1) 从 DG 对节点电压的影响角度考虑, DG 接入前电压较低的节点;
- 2) 对于不同的串并联支路处理方法不同。
 - a) 串联支路: 优先选取电压水平低于 0.975 pu 的末节点接入 DG;
 - b) 并联支路: 选取电压水平低于 0.975 pu 的节点接入 DG 或并联支路的根节点接入 DG。

具体接入 DG 的位置方案需依据系统计划引入 DG 个数综合考虑后确定。

4.2. 网损改善指标

微电网有功网损的大小主要与系统的支路电阻及节点电压相关。微电网电压等级较低, R/X 值较大, 潮流在馈线中的流动会造成较大的网络损耗, 合理的 DG 的分布会减小系统网损。考虑到 DG 安装后对系统网损的影响, 定义网损改善指标 I_{Ploss} 为:

$$I_{\text{Ploss}} = \frac{P_{\text{Loss(DG接入前)}}}{P_{\text{Loss(DG接入后)}}} \quad (8)$$

网损改善指标能够有效反应 DG 安装前后系统有功网损的变化, 可用来评估 DG 的经济效益。

4.3. 静态电压稳定性改善指标

系统静态电压稳定裕度是用来衡量系统静态电压稳定性的一个量化指标, 上文对系统的静态电压稳定性已有相关概述。因此, 定义静态电压稳定性改善指标 I_L 如式(9)所示, 该指标在一定程度上能反映 DG 接入前后系统的相对静态电压稳定程度。

$$I_L = \frac{L_{\text{(DG接入前)}}}{L_{\text{(DG接入后)}}} \quad (9)$$

4.4. DG 选址定容优化模型

微电网系统中 DG 接入位置、容量的不同对系统的有功网损及静态电压稳定性有较大影响。因此, 在 DG 接入系统前, 需确定其接入容量, 以满足微电网系统允许的稳定性、经济性并满足相关约束条件。本文建立的考虑有功网损及静态电压稳定裕度的 DG 优化容量模型如下:

$$\max f = \max (K_1 I_{\text{Ploss}} + K_2 I_L) \quad (10)$$

上式中, K_1, K_2 为权重系数, 且满足 $K_1 + K_2 = 1$ 。 K_1, K_2 不同的比例, 反映这两个目标在优化时所占比重不同, 本文按以下几种方案进行仿真:

- 方案 1: 有功网损最优, $K_1 = 1, K_2 = 0$;
- 方案 2: 静态电压稳定性最优, $K_1 = 0, K_2 = 1$;

方案 3: 综合效益最优, $K_1 = 0.5$, $K_2 = 0.5$ 。

由于分布式电源的接入必然引起馈线中传输的有功及无功功率的变化, 因此 DG 的定容就必然需考虑 DG 接入对电网潮流分布的影响, 并且各 DG 的出力在满足其上下限约束的基础上所有 DG 的出力总量需要满足分布式电源在微电网中的最大接入容量不能超过微电网负荷总量的 40%。系统各节点电压需满足上下限约束; 输电线路流过的电流也应满足相应热稳定极限, 不能超过其允许值。综合上述因素考虑, 形成如下约束:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - P_i(V, \theta) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i(V, \theta) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{i\min} \leq P_{Gi} \leq P_{i\max} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{Gi} \leq 0.4 \sum_{i=1}^N P_{Li} \quad (13)$$

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (14)$$

$$I_j \leq I_{j\max} \quad (15)$$

式中: P_{Gi}, Q_{Gi} 为节点 i 处 DG 的有功、无功出力; P_{Li}, Q_{Li} 为节点 i 处负荷的有功、无功功率; $P_{i\min}, P_{i\max}$ 为单台 DG 有功出力的下、上限值; $U_{i\min}, U_{i\max}$ 为节点电压允许的下、上限值; $I_{j\max}$ 为支路允许电流的上限值。N 为微电网系统的节点个数。

5. 模型的求解

5.1. 粒子群优化算法

粒子群优化算法于 1995 年提出, 是一种基于鸟类觅食行为的新群体智能进化计算技术。其优势在于算法简单、通用、鲁棒性好、精度高、收敛快、参数少而易实现, 对复杂非线性问题有着很好的优化能力, 已在电力系统的各优化领域得到广泛应用[10]。

设在一个 D 维搜索空间中, 采用 PSO 算法初始化后产生一群随机粒子(随机初始化 m 个粒子, m 行 D 列), 其中每个粒子都有一个位置矢量 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ 和一个速度矢量 $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$, 速度矢量决定了粒子的飞行方向和距离。每个粒子通过具体优化问题设计的适应度函数得到一个适应度值, 根据适应度值的大小可以比较粒子的优劣。第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置为 $p_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}], i = 1, 2, \dots, m$, 该位置适应度值为: $pbest_i = [pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{im}]$ 称为个体极值。整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为 $g = [g_1, g_2, \dots, g_D]$, 该位置适应度值为 $gbest$, 称为全局极值。

其中, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为种群规模。在迭代寻优过程中, 粒子通过不断地跟踪个体极值和全局极值来更新自己的位置和速度, 其位置和速度更新公式如下:

$$v_i^{(k+1)} = \omega \times v_i^{(k)} + c_1 \times rand_1 \times (p_i^{(k)} - x_i^{(k)}) + c_2 \times rand_2 \times (g^{(k)} - x_i^{(k)}) \quad (16)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + v_i^{(k+1)}, i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

式中: k 为迭代次数; ω 是惯性权重; c_1, c_2 是学习因子, 通常都取值为 2; $rand_1, rand_2$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。粒子飞行速度要小于粒子允许的最大速度 v_{\max} , v_{\max} 可以根据粒子的取值区间长度来确定。一般将最大速度设定为搜索空间的 20%~40%。惯性权重 ω 起着权衡局部最优和全局最优能力的作用。 ω 越大, 其全局寻优能力越强, 局部寻优能力越弱, 反之亦然。因此, 本文采用带惯性权重 PSO 调整 ω 的

策略, 让 ω 随着迭代过程的进行而线性地减少, 可以显著改善算法的收敛性能。第 k 次迭代的权重 ω_k 的表达式如下:

$$\omega_k = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (18)$$

式中, ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为初始权重、最终权重, k_{\max} 为最大迭代次数。迭代终止条件一般选为不超过最大迭代次数或粒子迄今为止搜索到的最优位置满足适应阈值。

5.2. 基于粒子群算法的 DG 选址定容流程

微电网中 DG 的选址定容优化问题求解步骤如下:

1) DG 的选址:

通过潮流计算得到微电网系统各节点电压分布(由于未接入 DG 时, 潮流沿馈线依次流向负荷节点, 因此, 各节点电压水平平均低于平衡节点的 1.00 pu (电压标么值))。将各节点电压水平降序排列。

a) 串联支路: 优先选取电压水平低于 0.975 pu 的末节点接入 DG;

b) 并联支路: 选取电压水平低于 0.975 pu 的节点接入 DG 或并联支路的根节点接入 DG。

具体接入 DG 的位置方案需依据系统计划引入 DG 个数综合考虑后确定, 然后继续下面的优化;

2) 采用带惯性权重的粒子群优化算法进行 DG 优化规划, 其具体流程如图 2 所示。

6. 算例分析

如图 3 所示为某 10KV10 节点微电网系统[11], 使用 MATLAB/7.0 编写程序。网络中 0 号节点为平衡节点, 本文将 DG 处理成 PQ 节点, 各节点安装容量范围是(0~3) MW, 单台 DG 的功率因数 $\lambda = 0.92$ 。规定分布式电源在微电网中的最大接入容量不能超过微电网负荷总量的 40%。系统各节点的电压允许偏差为 0.975 pu~1.025 pu (最大允许电压偏差率为 2.5%)。线路上流过电流的最大允许上限值为 0.3 KA。

分布式电源接入前, 微电网系统节点电压分布如图 4 所示。

由图 4 可知, DG 接入前系统电压水平可分为三个区:

I 区(<0.95 pu): 节点 2;

II 区(0.95 pu-0.975 pu): 节点 5、9、8、1 (升序);

III 区(0.975 pu-1.00 pu): 节点 4、7、6、3 (升序)。

6.1. DG 接入对系统电压分布的影响及选址

分别在各支路不同节点的 2、4、6、9 接入 DG, 接入 DG 的容量从(0~3) MW 以 0.1 MW 为梯度不断增加, 所得该微电网系统的电压分布曲线如图 5~图 8 所示。

从图 5 中可以看出, 节点 2 电压的提升对节点 1 电压提升有影响, 但影响相对较小。

从图 6 中可以看出, 节点 4 接入 DG, 对前节点 3 的电压提升小于节点 4, 对后面的节点 5 的电压提升几乎与节点 4 是平行关系。

由图 7 中可以看出, 当在节点 6 接入 DG 时, 对 7、8、9 节点电压的影响几乎是电压平行抬高的关系。

节点 9 通过影响节点 6 的电压水平, 继而对节点 7、8 产生电压抬升作用(几乎平行的效果)。

据此, 本文从 DG 接入对系统电压水平的影响这一角度考虑, 将 DG 优先接入节点按不同分支考虑, 对于串联分支:

a) 节点 1、2 所在串联支路, 由于 1 号节点的电压水平非常接近 0.975 pu, 而节点 2 的电压水平在 0.95pu 以下, 因此, 节点 2 优先接入 DG, 才能有效提升该节点的电压水平。

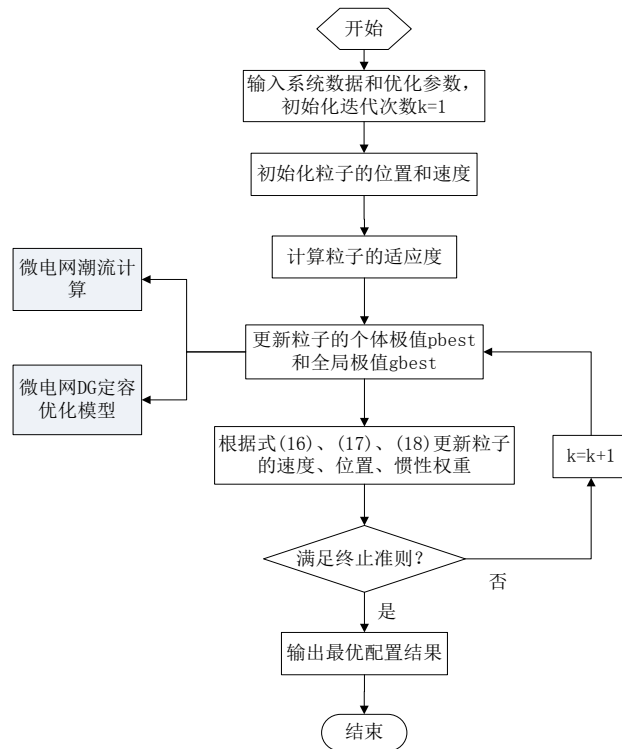


Figure 2. DG programming flow chart based on particle swarm optimization algorithm

图 2. 基于粒子群优化算法的 DG 规划流程图

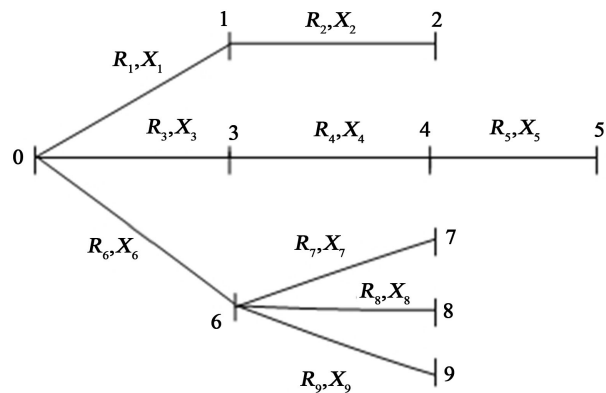


Figure 3. A structure diagram of 10KV 10 nodes microgrid system

图 3. 某 10KV10 节点微电网系统结构图

b) 节点 3、4、5 所在串联支路，由于节点 3、4 的电压水平均在 0.975 pu 以上，节点 5 的电压水平在 0.95 pu~0.975 pu 之间，因此，对于该支路应优先在节点 5 接入 DG。

c) 节点 6~9 所在并联支路，节点 8、9 电压水平均在 0.975 pu 以下，因此，欲提高节点 8、9 电压水平，需在节点 8、9 接入 DG (优先选择)或在节点 6 接入 DG 或其他选择。

假定该微电网系统计划接入 4 台 DG，则依据上文分析可知，优先选取节点 2、5、8、9 接入 DG。

6.2. DG 定容研究

选取带惯性权重的粒子群优化算法进行求解，以 3.4 节所示目标函数为模型，并按 3.4 节接入 DG 的

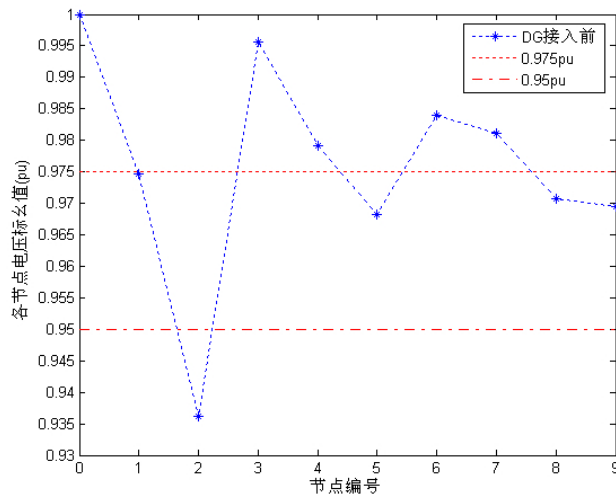


Figure 4. Nodes' voltage values without DG
图 4. DG 接入前各节点电压标么值

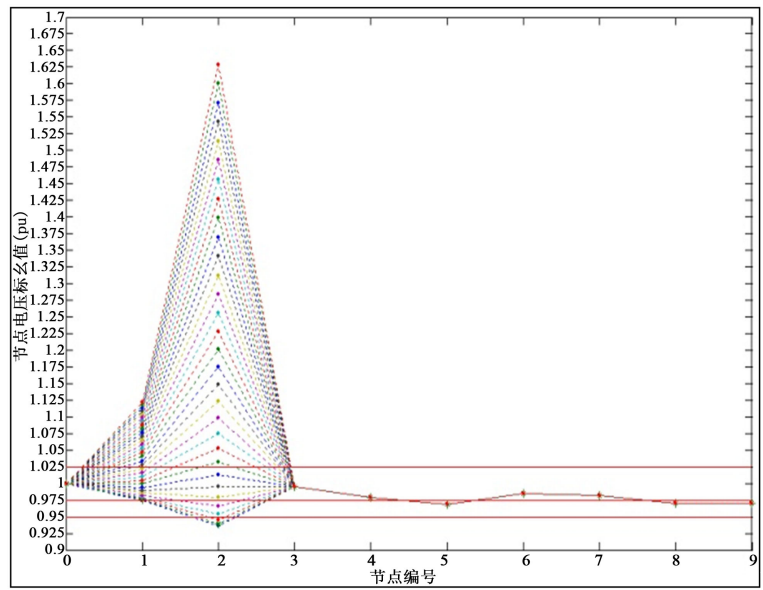


Figure 5. System's voltages distribution curve chart when node 2' voltage values with DG's capacity from 0 MW to 3 MW
图 5. 节点 2 接入分布式电源容量由 0 MW 至 3 MW (0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 3 MW)时, 系统电压分布曲线图

方案选取满足相关约束条件的不同的 K_1 和 K_2 值, 优化 DG 的布局, 并与未接入 DG 时的方案 0 进行比较。

优化结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 未接入 DG 时, 该微电网系统的有功网损为 191.47 KW, 系统静态电压稳定指标 L 值为 0.1517, 该数值较大, 可能会导致系统在小扰动情况下可能发生电压不稳定甚至崩溃。

对比方案 0 与方案 1/2/3, 优化后系统的网损明显减小, 经济效益非常可观。优化后系统静态电压稳定指标也相应变小, 系统将能够承受更大的负荷增长范围, 具有更好的静态电压稳定性。此外, 由图 9 可以看出, 整个微电网系统的电压水平由优化前的最低约 0.93 pu 到优化后的节点电压均在 0.975 pu~1.00 pu

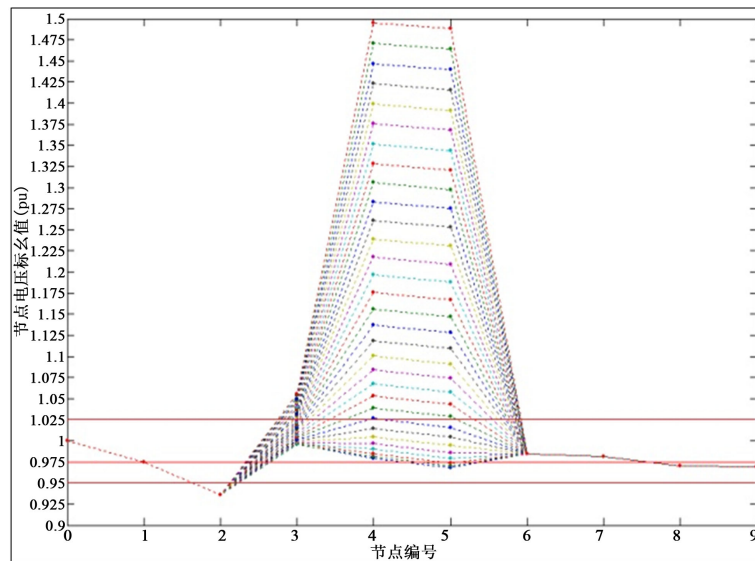


Figure 6. System's voltages distribution curve chart when node 4' voltage values with DG's capacity from 0 MW to 3 MW

图 6. 节点 4 接入分布式电源容量由 0 MW 至 3 MW (0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 3 MW) 时, 系统电压分布曲线图

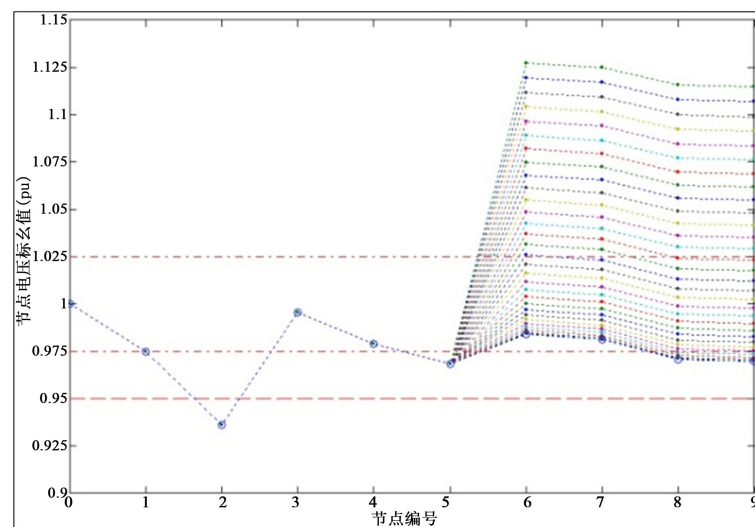


Figure 7. System's voltages distribution curve chart when node 6' voltage values with DG's capacity from 0 MW to 3 MW

图 7. 节点 6 接入分布式电源容量由 0 MW 至 3 MW (0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 3 MW) 时, 系统电压分布曲线图

之间, 微电网系统的电压水平有明显改善。

从方案 1/2 的对比优化(表 1)可以看出, 当分别选取不同的权重系数进行优化时, 系统的各项指标均较无 DG 时有较大改善并在相应的方案中最优。对比方案 1/2 与方案 3, 可知, 侧重于从某一角度进行优化相比于综合优化而言, 方案 3 所得到的网损及静态电压稳定性这两个指标均有一定程度的平衡, 从而达到了协调优化的效果。此外, 各节点的电压水平亦有较大的改善, 最大电压偏差率由优化前的 6.384% 提高到最大允许电压偏差率的 2.5% 以内。由此可知, 采用本文方法不仅可从不同侧重点来优化微电网 DG 布局, 还能有效改善系统的运行条件, 改善系统的电压水平, 提高系统的静态电压稳定性及经济效益。

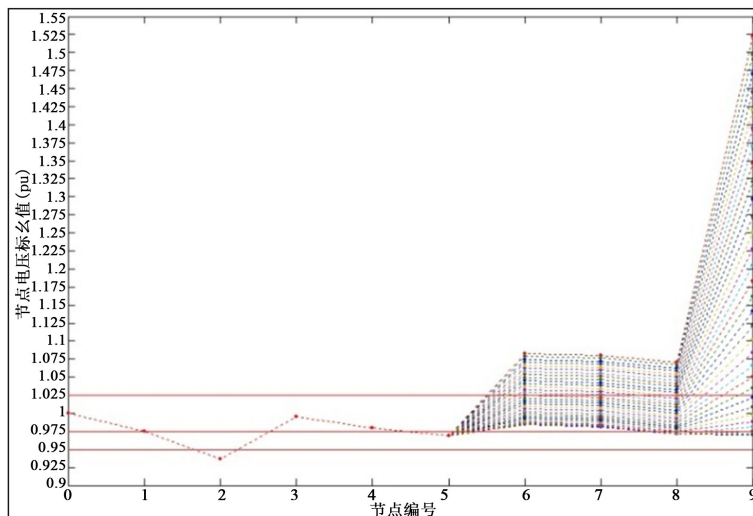


Figure 8. System's voltages distribution curve chart when node 9' voltage values with DG's capacity from 0 MW to 3 MW (0, 0.1, 0.2, 0.3,..., 3 MW)时, 系统电压分布曲线图

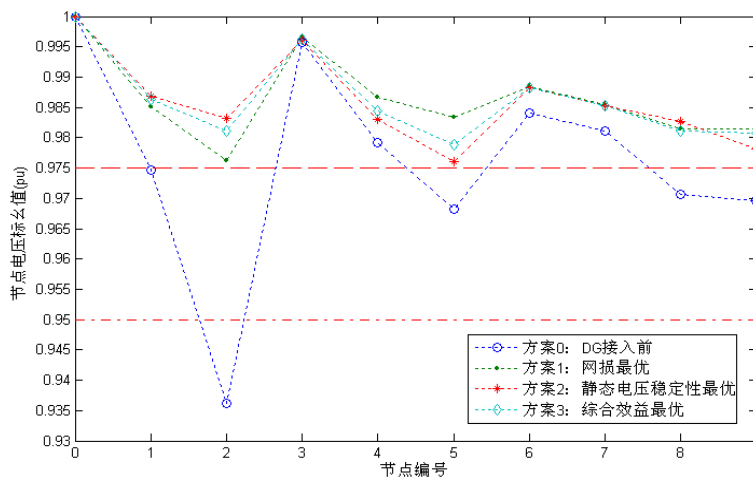


Figure 9. Each node per-unit value of four schemes
图 9. 四种方案各节点电压标么值

Table 1. Comparison of the optimization results
表 1. 优化结果比较

方案	优化结果(MW)	网损(KW)	L 值	最大电压偏差率(%)
0	—	191.47	0.1517	6.384%(节点 2)
1	2 (1.4106) 5 (0.4223) 8 (0.6757) 9 (0.4915)	53.684	0.0590	2.379%(节点 2)
2	2 (1.6684) 5 (0.2161) 8 (0.8306) 9 (0.2850)	57.366	0.0520	2.389%(节点 5)
3	2 (1.5941) 5 (0.2913) 8 (0.6621) 9 (0.4525)	55.014	0.0540	2.120%(节点 5)

注：规划结果中，括号前数字为 DG 接入节点编号，括号内数字为 DG 容量(MW)，功率因数 λ 0.92。

7. 结论

在微电网发展过程中, 如何安全、可靠地接入分布式电源是微电网发展过程中面临的一大难题。对于这一问题, 本文提出了 DG 规划阶段选址定容的一种新思路, 在通过分析各串并联支路接入 DG 对系统电压分布影响的基础上优化选址, 然后以微电网系统网损及静态电压稳定指标 L 综合作为目标函数, 考虑了相关约束条件, 并采用带惯性权重的粒子群算法进行求解。最后, 以一个算例仿真分析验证模型和算法的正确性与有效性, 具有一定的实用价值。

基金项目

中小企业发展专项资金(对欧合作部分)。项目名称: 建筑和工业能效管理核心技术及关键设备研究。项目序号: SQ2013ZOC500004。

参考文献 (References)

- [1] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等 (2010) 分布式发电对配电网影响的综合评估. *电力系统保护与控制*, **21**, 132-135.
- [2] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等 (2004). 分布式发电对配电网电压分布的影响. *电力系统自动化*, **16**, 56-60.
- [3] 陈海焱, 段献忠, 陈金富 (2006) 分布式发电对配网静态电网电压稳定性的影响. *电网技术*, **19**, 27-30.
- [4] 崔弘, 郭熠昀, 夏成军 (2010) 考虑环境效益的分布式电源优化配置研究. *华东电力*, **12**, 1968-1971.
- [5] Mitra, J., Vallem, M.R. and Patra, S.B. (2006) A probabilistic search method for optimal resource deployment in a microgrid. *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH*, Stockholm, 11-15 June 2006.
- [6] 朱勇, 杨京燕, 张冬清 (2011) 基于有功网损最优的分布式电源规划. *电力系统保护与控制*, **21**, 12-16.
- [7] 戴小庞, 周洪, 海晓涛 (2011) 基于免疫遗传算法的含分布式电源配网规划. *湖南电力*, **6**, 10-13.
- [8] Zhang, L.M., Tang, W. and Guan, H.H. (2009) The back/forward sweep-based power flow method for distribution networks with DGs. *2009 2nd International Conference on Power Electronic and Intelligence Transportation System (PEITS)*, **1**, 145-149.
- [9] 刘健, 毕鹏翔, 杨文字, 等 (2007) 配电网理论及应用. *中国水利水电出版社*, 北京, 115-122.
- [10] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995) Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, **4**, 1942-1948.
- [11] 王真 (2007) 含分布式发电的配电网规划研究. 硕士学位论文, 华北电力大学, 北京.