

# The Impact of Distributed Generation Access on Steady-State Operation of the Distribution Network

Xu Zhang<sup>1</sup>, Hua Gao<sup>1</sup>, Lijuan Li<sup>1</sup>, Jianbo Liao<sup>2</sup>, Zhenkun Li<sup>2</sup>, Yang Fu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grid Planning Research Center of Guizhou Power Grid Corporation, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai

Email: [emailzhangxu@126.com](mailto:emailzhangxu@126.com), [liaojianbo@163.com](mailto:liaojianbo@163.com)

Received: Jul. 16<sup>th</sup>, 2015; accepted: Aug. 8<sup>th</sup>, 2015; published: Aug. 11<sup>th</sup>, 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

The gradual depletion of traditional energy and aggravation of environmental pollution makes distributed generation applications increasingly widespread. Distributed generation access has changed the structure of the distribution network and caused a series of effects on steady-state operation of the distribution network. This paper analyzes the power flow calculation of the distribution network including distributed generation and the treatments of various types of distributed generation are given. From three angles of capacity, access location and power factor, a detailed study about the impact of distributed generation access for distribution network voltage and network losses is implemented. Example simulation results show that the capacity of distributed generation shouldn't be too large, access location should be selected in the center-rear of the feeder, power factor should be as high as possible and for the lag, which are conducive to the stability of distribution network voltage and reduce network losses.

## Keywords

Distributed Generation, Distribution Network, Power Flow Calculation, Voltage Influence, Network Loss Influence

---

# 分布式电源接入对配电网稳态运行的影响

张 栩<sup>1</sup>, 高 华<sup>1</sup>, 李丽娟<sup>1</sup>, 廖剑波<sup>2</sup>, 李振坤<sup>2</sup>, 符 杨<sup>2</sup>

<sup>1</sup>贵州电网公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳

文章引用: 张栩, 高华, 李丽娟, 廖剑波, 李振坤, 符杨. 分布式电源接入对配电网稳态运行的影响[J]. 智能电网, 2015, 5(4): 172-181. <http://dx.doi.org/10.12677/sg.2015.54021>

<sup>2</sup>上海电力学院电气工程学院, 上海

Email: [emailzhangxu@126.com](mailto:emailzhangxu@126.com), [liaojianbox@163.com](mailto:liaojianbox@163.com)

收稿日期: 2015年7月16日; 录用日期: 2015年8月8日; 发布日期: 2015年8月11日

## 摘要

传统能源的逐渐枯竭和环境污染的加重使得分布式电源的应用日益广泛。分布式电源的接入改变了配电网的网络结构, 对配电网的稳态运行产生了一系列影响。本文研究分析了含分布式电源配电网的潮流计算, 给出了各类型分布式电源的处理方法, 并从分布式电源容量、接入位置、功率因数三个角度着手, 详细研究了分布式电源接入对配电网稳态运行的电压和网损的影响。算例仿真结果表明, 分布式电源容量不宜过大、接入位置宜选在馈线中后部、运行功率因数应尽可能高且为滞后, 这些都有利于配电网的电压稳定和网损降低。

## 关键词

分布式电源, 配电网, 潮流计算, 电压影响, 网损影响

## 1. 引言

近年来, 全球范围内的环境污染和能源危机日益严重, 而节能减排和低碳环保的呼声也越发高涨。随着火力发电资源与环境成本的不断提高, 以及电力用户对供电可靠性要求的不断提高, 传统的集中发电、远距离输电的电力系统供电模式的不足也日益呈现。在这种大背景下, 分布式发电(Distributed Generation, DG)逐渐发展起来。分布式发电技术作为传统大电网的重要补充, 对于提高供电可靠性、运行灵活性, 对于降低投资成本、减少环境污染十分有利, 分布式电源的大规模接入将成为未来配电网发展的新趋势。

随着分布式电源在配电网渗透率的不断提高, 分布式电源接入配电网所带来的问题也越发凸显, 为此学者们做了大量研究。文献[1]提出了含分布式电源的三角形负荷分布模型, 通过与均匀负荷模型和严格潮流计算进行对比, 验证了所提模型在潮流计算中的正确性, 在此基础上分析了 DG 出力和接入位置对配电网电压分布的影响。文献[2]采用前推回代法进行潮流计算, 分析研究了 DG 相对容量和安装位置对于配电网网损的影响。文献[3]建立了电压变化率指标, 可用于定量描述分布式发电对配电系统电压分布的影响, 并得出了诸多重要结论。文献[4]以 IEEE33 结点为算例基础, 较为完整的总结了 DG 相对容量、安装位置和功率因数对于配电网电压分布的影响, 并强调了含有 DG 的配电网中调压和无功优化的重要性。文献[5]总结了潮流计算中对 DG 节点的处理方法, 对某接入 DG 的实际配电网进行了稳态潮流电压和暂态稳定性的分析, 并提出了相应的提高稳定性的控制策略。

本文的主要工作是研究 DG 接入对配电网稳态运行的电压和网损两个参数的影响。首先将介绍分布式发电技术及其对配电网的影响, 接着阐述含分布式电源配电网的潮流计算的基本原理, 最后通过 IEEE33 结点配电系统的算例分析, 以 matlab 为编程软件, 从 DG 容量、接入位置、功率因数三个角度着眼, 分析总结 DG 接入对配电网稳态运行的电压和网损的影响, 给出有益的建议。

## 2. 分布式发电及其对配电网的影响分析

### 2.1. 分布式发电技术

分布式发电[6] [7], 通常是指布置在配电网或电力用户附近, 对已有配电网的经济运行起到支持作用

或能够满足用户的某些特殊需求的分散式发电系统，其发电功率在几千瓦到几十兆瓦之间。分布式发电的主要特点是规模较小、装设位置靠近负荷、环境友好、运行方式灵活等。分布式发电能提高负荷的供电质量和供电可靠性，减少环境污染，它既可直接为负荷供电，也可以并网运行。分布式发电技术与集中发电、远距离输电、大电网互联的传统发供电形式有明显区别。

常见的分布式电源有小水电、微型燃气轮机、燃料电池、太阳能光伏电池、风力发电机、储能设备等等。

## 2.2. 分布式发电对配电网的影响

随着电力市场的进一步开放与分布式发电技术不断进步、成本不断降低，大量的分布式电源被接入配电网。DG 的接入使得传统配电网的结构和运行发生了很大的变化[2] [7] [8]。

配电网接入 DG 后，可以从一定程度上消除网络的过负荷和阻塞，增加配电网的输电裕度，具有低电压穿越能力的 DG 还能在系统故障时继续为重要负荷供电，缓解系统电压的跌落，提高系统的电压调节能力，这些都有利提高系统的可靠性。同时，DG 的存在会对配电网的继电保护装置产生一系列影响：DG 向电网注入功率会缩小继电器的保护范围；DG 持续提供短路电流可能造成电弧重燃，导致重合闸不成功；DG 的存在可能引起保护的拒动和误动作等。这可能降低系统的可靠性和安全性，因此分布式发电必须与配电网原有的大量继电保护装置相适应。

接入 DG 的配电网由单电源供电系统，变成了多电源供电系统，整个网络的潮流流动将发生很大变化，进而影响到配电网的各节点电压和各支路网损。总的来说，当选择适宜的 DG 容量、接入位置和功率因数时，DG 的接入可以减少线路中传输的功率，降低电压损耗，并向系统提供一定量的无功，能够有效改善配电网的电压水平、降低系统的网络损耗。研究 DG 容量、接入位置和功率因数对于配电网稳态运行时电压和网损的影响是本文工作的重点，为此引入系统平均电压偏差和系统总网损两个指标。系统平均电压偏差的计算方法为：

$$\overline{\Delta V} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta V_i}{N} \quad (1)$$

其中： $\overline{\Delta V}$  为系统平均电压偏差；N 为节点数； $\Delta V_i$  为第 i 个节点的电压偏差。该指标用于定量分析系统电压偏离额定值的程度。系统总网损的计算方法为：

$$\Delta P_{\text{loss}} = \sum_{j=1}^M \Delta P_{\text{loss},j} \quad (2)$$

其中： $\Delta P_{\text{loss}}$  为系统总网损；M 为支路数； $\Delta P_{\text{loss},j}$  为第 j 条支路的网损。该指标用于定量分析配电系统总体网络损耗的大小。

另外，DG 会给配电网带来电能质量的问题。由于间歇性 DG 的出力受到天气等条件的影响，具有较大的不确定性和随机性，其出力变化或突然启停可能造成电压闪变、波动和跌落。加之多数 DG 的并网是通过由电力电子器件组成的逆变系统来实现的，电力电子器件具有非线性特性，这会对配电网造成一定的谐波污染。

随着 DG 渗透率的不断提高，如何加强对 DG 的控制和管理、提高配电网对新能源的消纳能力、更好地发挥 DG 的有益作用，已经成为配电网研究的热点。近年来，有专家学者提出了有源配电网或主动配电网(active distribution network, AND)的概念[9] [10]，进一步阐述了含有 DG 的配电网的发展趋势。可见，研究 DG 对于配电网的影响是十分重要而有意义的。

### 3. 含分布式电源配电网的潮流计算

对于配电网，前推回代法是潮流计算中广泛使用的一种方法。传统前推回代法的基本思想是：假设各节点电压为额定电压，从末端向首端、前推求出配电网各支路电流；再依据各支路电流，从首端向末端、回代求出各节点电压；接着反复进行前推、回代计算，做多次迭代，直至满足一定的收敛条件。

含有 DG 的有源配电网的潮流计算较传统配电网更为复杂，表现为 DG 的接入使得潮流方向不再固定、各类型 DG 的潮流计算模型不尽相同。而传统前推回代法只便于处理 PQ 节点[11]。因此，对各类型 DG 进行详细的模型处理是前推回代法求解有源配电网潮流的关键所在[12]。表 1 列出了各类型 DG 对应的常用节点类型。

#### 3.1. PQ 型 DG 的处理方法

PQ 型 DG 输出的有功和无功功率为恒定值。只需当作负的负荷处理即可。此时等效节点为：

$$\begin{cases} P'_{LD} = P_{LD} - P_{DG} \\ Q'_{LD} = Q_{LD} - Q_{DG} \end{cases} \quad (3)$$

其中： $P'_{LD}$  和  $Q'_{LD}$  为等效节点的有功和无功负荷值； $P_{LD}$  和  $Q_{LD}$  为原节点的有功和无功负荷值； $P_{DG}$  和  $Q_{DG}$  为 DG 的有功和无功出力。

#### 3.2. PQ(V)型 DG 的处理方法

PQ(V)型 DG 输出的有功功率为恒定值，输出的无功功率与节点电压有关。只需在每次迭代计算出节点电压后，更新 DG 输出的无功功率即可，其余与 PQ 型 DG 的处理方法相同。处理方法为：

$$Q_{DG} = Q(V) \quad (4)$$

$$\begin{cases} P'_{LD} = P_{LD} - P_{DG} \\ Q'_{LD} = Q_{LD} - Q_{DG} \end{cases} \quad (5)$$

其中： $V$  为节点电压；函数  $Q(V)$  由具体的 DG 类型决定。

#### 3.3. PI 型 DG 的处理方法

PI 型 DG 输出的有功功率和电流为恒定值。类似的，在迭代得到节点电压  $V$  后，通过算式修正 DG 输出的无功功率，之后按照 PQ 型 DG 的来处理：

$$Q_{DG} = \sqrt{|V|^2 |I_{DG}|^2 - P_{DG}^2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P'_{LD} = P_{LD} - P_{DG} \\ Q'_{LD} = Q_{LD} - Q_{DG} \end{cases} \quad (7)$$

Table 1. Node type corresponding to various types of DG

表 1. 各类型 DG 对应的节点类型

DG 类型	节点类型
风机	PQ、PQ(V)
光伏	PQ、PV、PI
燃料电池	PV、PI
微型燃气轮机	PQ、PV、PQ(V)

其中： $I_{DG}$  为 DG 恒定的输出电流。

### 3.4. PV 型 DG 的处理方法

PV 型 DG 输出的有功功率和电压为恒定值。传统的前推回代法无法保持节点电压为定值，因此对 PV 型 DG 需要进行特殊处理，不断更新 DG 无功功率以修正节点电压，在迭代得出各节点电压  $V$  后，修正方法为[11]：

$$\Delta V = V - V_N \quad (8)$$

$$\Delta Q = X^{-1} |\Delta V| \quad (9)$$

$$Q^{K+1} = Q^K + \Delta Q \quad (10)$$

其中： $V_N$  为 DG 恒定的输出电压； $\Delta V$  为电压偏差； $\Delta Q$  为 DG 无功修正量； $X$  为 PV 型 DG 的节点电抗矩阵，其具体形成方法可参见文献[12]； $Q^K$  为第  $k$  次迭代的 DG 无功功率。修正后，与 PQ 型 DG 的处理方法相同：

$$\begin{cases} P'_{LD} = P_{LD} - P_{DG} \\ Q'_{LD} = Q_{LD} - Q_{DG} \end{cases} \quad (11)$$

### 3.5. 计算流程

以上述各类型 DG 的处理方法为基础，应用前推回代法来求解有源配电网的稳态潮流，其流程图如图 1 所示，具体的计算步骤如下：

- 1) 设置系统支路阻抗、节点负荷等原始参数。
- 2) 设置 DG 参数。设各节点初始电压为额定电压；设置 PQ 型 DG 的 P、Q 值；设置 PQ(V)型 DG 的 P 值，并计算 Q 值；设置 PI 型 DG 的 P、I 值，计算 Q 值；设置 PV 型 DG 的 P、V 值和 Q 初值，生成节点电抗矩阵  $X$ 。
- 3) 计算各节点的负荷与 DG 的总注入电流。
- 4) 前推计算各支路电流。
- 5) 回代计算各节点电压。
- 6) 收敛判断。PV 型 DG 节点以  $|U_i^{(k)} - U_N| \leq \varepsilon$  为收敛条件；其余节点以  $|U_i^{(k)} - U_i^{(k-1)}| \leq \varepsilon$  为收敛条件；也可以最大迭代次数为收敛条件。若所有节点均满足收敛条件，则得出潮流解，算法结束；否则进入 7)。
- 7) 无功修正。由新迭代出的各节点电压，更新修正 PQ(V)型 DG、PI 型 DG、PV 型 DG 的 Q 值。并判断 PV 型 DG 的 Q 值是否越限，若越上(下)限，则令 Q 值等于上(下)限，并将此 PV 型 DG 转换为 PQ 型 DG，之后转入步骤 3)。

本文将 DG 视为 PQ 类型，应用前推回代法对含分布式电源的配电网算例进行潮流计算，求出稳态电压和网损，进而分析 DG 接入对配电网稳态运行的影响。

## 4. 算例与分析

本文选用 IEEE33 结点配电系统作为算例，如图 2 所示，系统参数见文献[13]。在配电网的某些结点接入 DG，改变 DG 的容量、接入位置和功率因数，通过前述方法进行潮流计算，以 matlab2014a 为编程工具，来进行 DG 的接入对配电网稳态电压和网损影响的研究。

### 4.1. DG 容量对配电网电压和网损的影响

为问题研究的方便，设配电网中 DG 数为 1。设 DG 接在节点 12，DG 运行的功率因数取为 0.9 滞后，

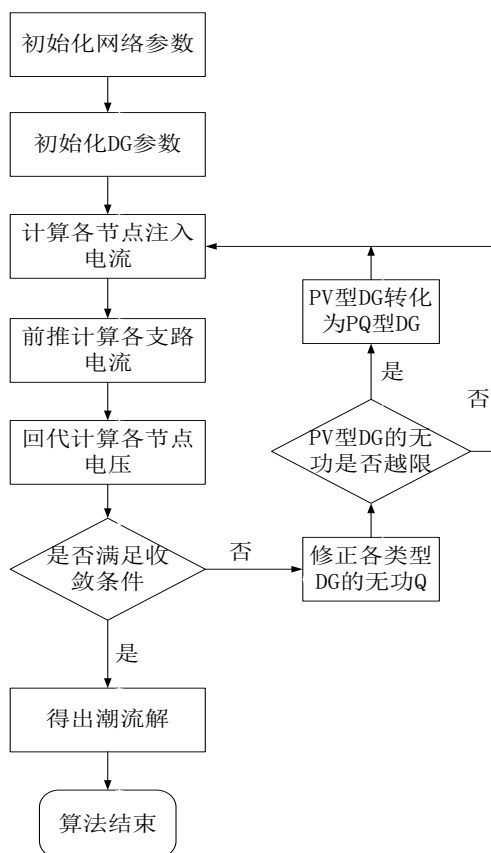


Figure 1. Power flow calculation flow chart of distribution network with DG

图 1. 含分布式电源配电网的潮流计算流程图

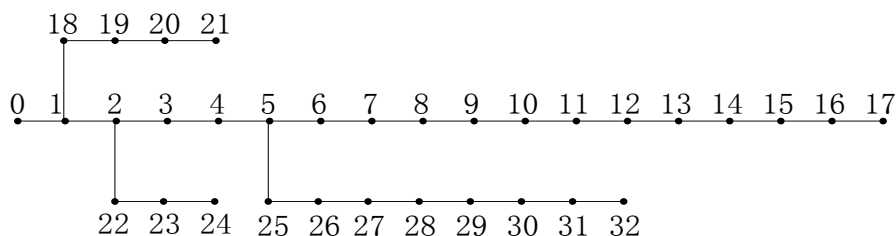


Figure 2. IEEE 33 nodes distribution system

图 2. IEEE 33 节点配电系统

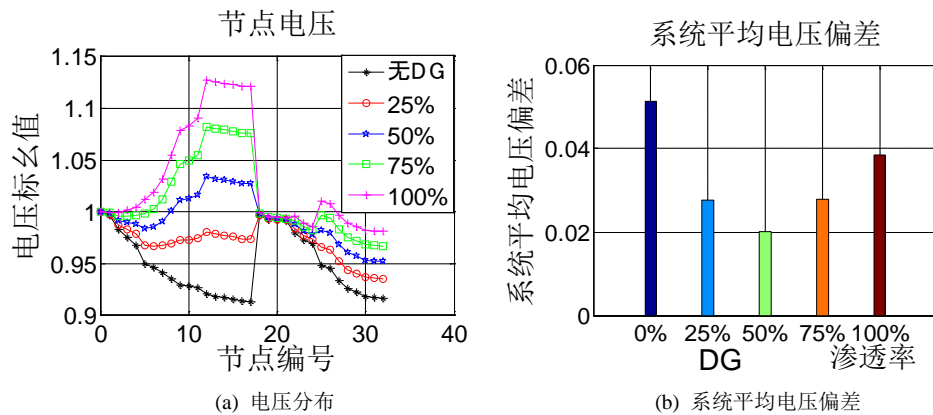
改变 DG 的有功出力如表 2 所示, 其中渗透率为 DG 容量占总有功负荷的百分比。

由图 3(a)可知, 在配电网中接入 DG 对于配电网电压提高的效果十分明显。未接入 DG 时, 馈线后部节点电压偏低; 接入 DG 以后, 由于减少了配电网线路中传输的功率、减少了电压损耗, 同时 DG 又作为无功源发出无功, 使得电网的整体电压得到提高。这种电压提高效果随着 DG 容量的增大而增大, 且提高效果在 DG 接入节点(12)附近更加显著。应充分注意到, 当接入 DG 容量过大(如图中达到 75%、100% 渗透率)时, 将造成系统中一些节点的电压严重越限, 因此接入系统的 DG 容量不宜选的过大。分析图 3(b)可知, 接入 DG 后系统的平均电压偏差明显减小, 电压质量明显改善, 且在 DG 容量为负荷的 50% 左右时, 系统平均电压偏差值最小、电压质量最优。

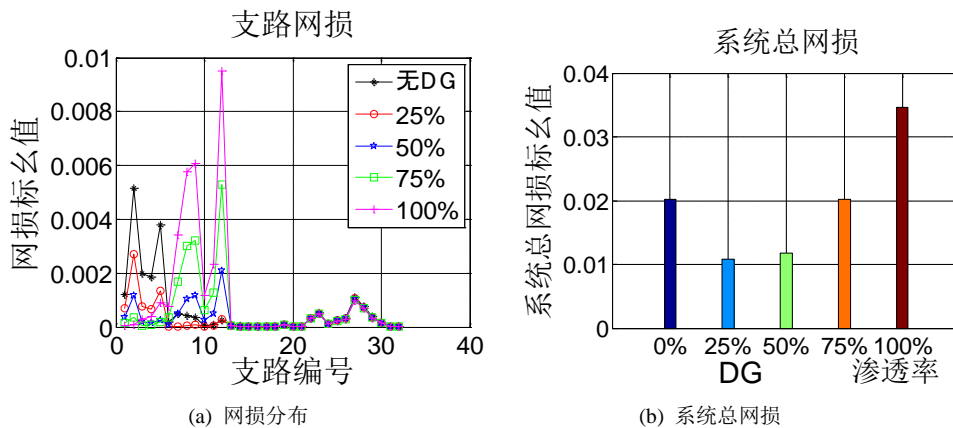
由图 4(a)仿真结果可以看出, 当容量适宜时, 接入 DG 能够减小前部馈线的传输功率, 抬高电压水

**Table 2.** The change of DG capacity  
**表 2.** DG 容量的变化

编号	1	2	3	4
DG 容量/kW	928.75	1857.50	2786.25	3715.00
DG 渗透率/%	25	50	75	100



**Figure 3.** System voltage level corresponding to different DG capacity  
**图 3.** 不同 DG 容量对应的系统电压水平



**Figure 4.** System losses level corresponding to different DG capacity  
**图 4.** 不同 DG 容量对应的系统网损水平

平, 减小网损。但是, 若 DG 的容量过大(如图中渗透率达到 75%、100%), 会造成 DG 接入节点的邻近前支路发生潮流反向逆流, 增加这些支路的线路传输功率, 使得网损变大。从降低网损的角度看, DG 的容量也不宜选的过大。从图 4(b)可知, 当 DG 容量为负荷的 25%~50%时, DG 的接入对于降低系统的网络损耗是十分有利的, 而过大的 DG 容量将增大系统的网损。

#### 4.2. DG 位置对配电网电压和网损的影响

设 DG 容量为负荷的 40%, 即有功出力为 1486 kW, 运行的功率因数取为 0.9 滞后, 改变 DG 的接入位置如表 3 所示, DG 的接入位置选择了具有代表性的主馈线前部、中部、中后部和末端。

由图 5(a)仿真结果, 可知当出力与功率因数一定时, DG 接入的位置对电压分布有较大影响。从总体上看, DG 接入节点越靠近母线, DG 的接入对抬高系统电压的作用越不明显; 反之, DG 接入节点越靠

近馈线末端, DG 的接入对系统电压的提高作用越显著。从图 5(b)可知, 接入 DG 有利于降低系统的电压偏差, 将 DG 装设在馈线的中后部, 对于抬高系统电压、降低系统电压偏差的效果是最佳的。

由图 6(a)分析可知, DG 的接入位置不同, 网损也会产生某些变化。大体来说, DG 的接入能够使得配电网前部的网损降低, 这是由于 DG 能够就地供给负荷电能, 减少了前部线路传输的功率, 因而可以起到降低前部馈线网损的作用。但是当 DG 接在馈线末端时, 由于馈线末端潮流反向逆流, 末端线路传输的功率增大, 将造成这些支路网损增大, 这是不利的。综合图 6(b), DG 接入在馈线的中部、中后部, 最有利于降低系统的网损。

### 4.3. DG 功率因数对配电网电压和网损的影响

设 DG 容量为负荷的 40%, 即有功出力为 1486 kW, 接入节点为节点 12, 改变 DG 运行的功率因数如表 4 所示。

图 7(a)的仿真结果表明, DG 运行在不同的功率因数, 将对系统电压产生不同影响。滞后的功率因数

Table 3. The change of DG access location  
表 3. DG 接入位置的变化

编号	1	2	3	4
DG 接入节点	2	7	12	17

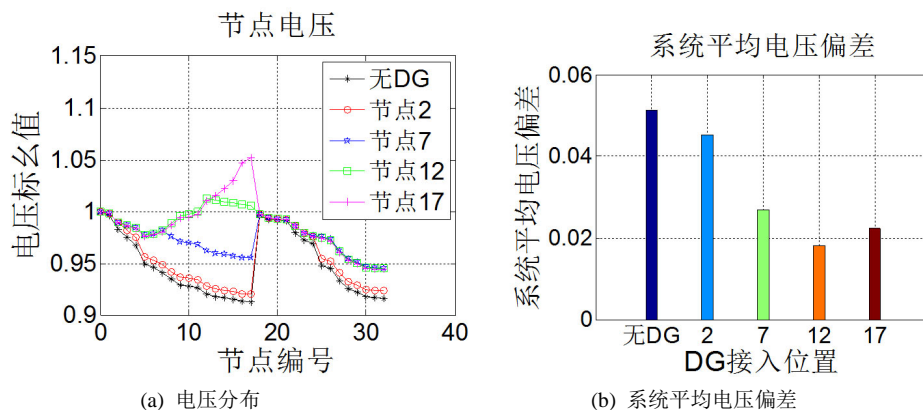


Figure 5. System voltage level corresponding to different DG location

图 5. 不同 DG 位置对应的系统电压水平

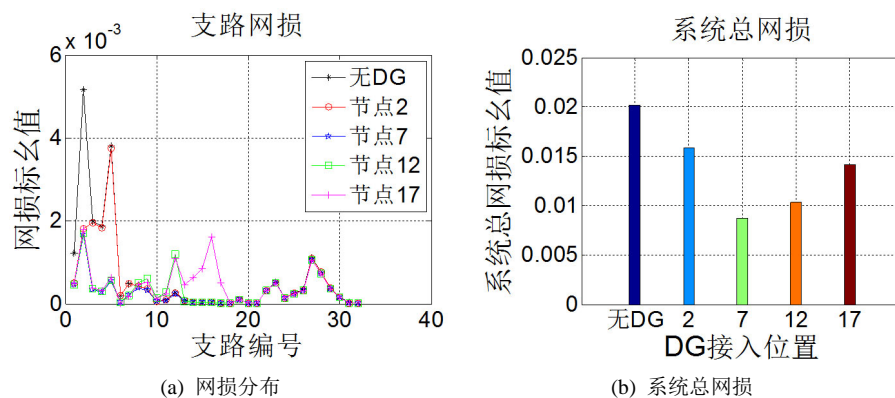


Figure 6. System losses level corresponding to different DG location

图 6. 不同 DG 位置对应的系统网损水平

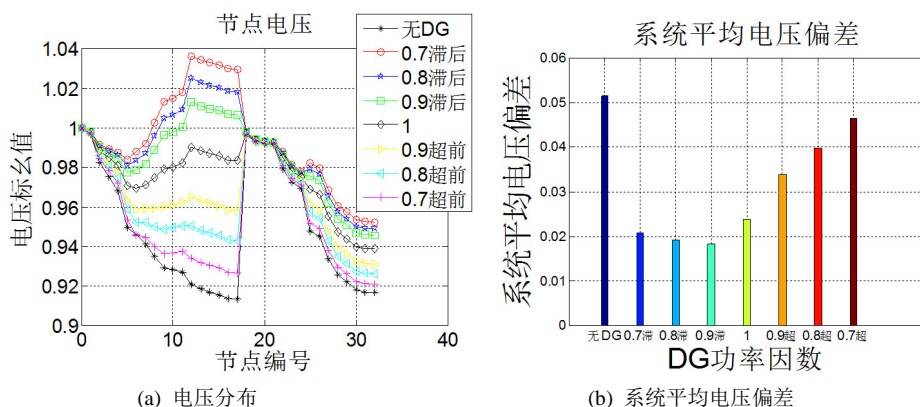


能够对系统电压起到支撑作用，其效果要好于超前。当 DG 以超前功率因数接入系统时，DG 向系统吸收无功，功率因数越小，吸收无功越多，抬高系统电压的作用越不明显。当 DG 以滞后功率因数接入系统时，DG 向系统发出无功，功率因数越小，发出无功越多，将系统电压抬高得越多。当 DG 功率因数为 1 时，只发出有功，既不发出无功，也不吸收无功，此时 DG 对系统电压支持作用的效果介于超前和滞后之间。鉴于间歇性 DG 出力不稳定的考虑，系统的电压不应过多地由 DG 来支撑，否则一旦 DG 出力不足或退出运行，系统将产生较大的无功缺额，电压将偏低于系统的正常电压。因此，接入配电系统的 DG 应该多发有功，少发无功，尽量维持在高的滞后功率因数运行。图 7(b)也同样表明 DG 运行在高滞后功率因数最能够使系统电压维持在额定电压附近，有效减少系统电压偏差，功率因数超前或为 1 的降低电压偏差效果显然不如滞后。

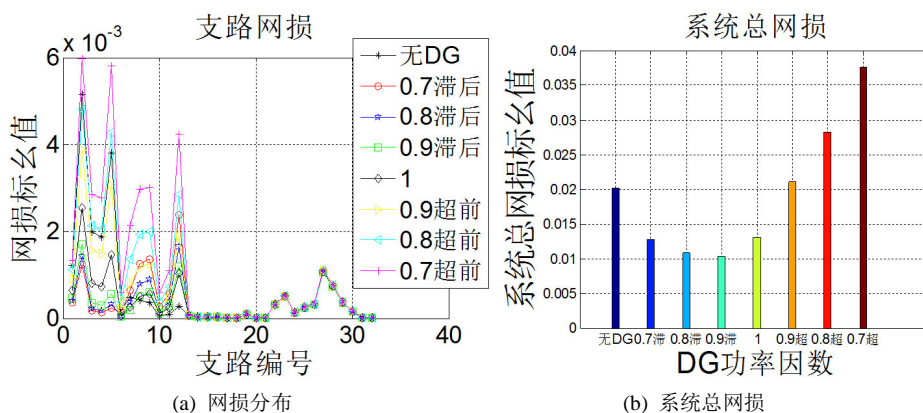
由图 8(a)可知，DG 运行在超前功率因数将增大系统的网损，且功率因数越小，增大网损越多，这是因为运行在超前功率因数的 DG 将会从系统中吸收无功，增加线路中传输的无功，使网损增大，功率因

**Table 4.** The change of DG power factor  
**表 4.** DG 功率因数的变化

编号	1	2	3	4	5	6	7
DG 功率因数	0.7 滞后	0.8 滞后	0.9 滞后	1	0.9 超前	0.8 超前	0.7 超前



**Figure 7.** System voltage level corresponding to different DG power factor  
**图 7.** 不同 DG 功率因数对应的系统电压水平



**Figure 8.** System losses level corresponding to different DG power factor  
**图 8.** 不同 DG 功率因数对应的系统网损水平

数越小, 吸收的无功越多, 网损越大。反之, 运行在滞后功率因数的 DG 能够减少系统的网损, 且功率因数越小, 减少网损越多, 这是因为运行在滞后功率因数的 DG 将会发出无功, 补偿系统负荷的无功, 减少线路中传输的无功, 从而使网损减小, 功率因数越小, 发出的无功越多, 网损越小。图 8(b) 同样说明了运行在高滞后功率因数的 DG 的降损效果最佳, 而运行在超前功率因数的 DG 将导致系统网损的增大。功率因数为 1 的 DG 同样能够起到降损的作用, 这是由于 DG 的有功出力减少了线路上传输的有功功率。

## 5. 结语

通过算例仿真, 从各个方面分析研究了分布式电源接入对配电网稳态运行的影响。分布式电源的容量、接入位置和运行功率因数均会对配电网的电压和网络损耗造成不同的影响。从总体上说, 对于传统的辐射状配电网, 接入 DG 后, 只要选择合适的容量、安装位置和功率因数, 就能够有效减少馈线上传输的功率, 并提供系统一定量的无功补偿, 从而起到电压支持和降低网损的作用。

具体地说, DG 容量不宜选的过大, 否则将造成电压越限或网损增大, 也可能出现 DG 退出运行时系统电压将大幅跌落的问题; DG 的接入位置不宜选在馈线前部或后部, 因为接在前部不能有效发挥 DG 的有益作用, 接在后部则 DG 对于系统电压的支持作用过于显著且降损效果不好, 综合考虑宜选择馈线中后部位置接入 DG; DG 运行的功率因数应为滞后且应保持高功率因数运行, 输出一定量的无功功率, 但无功不宜过大, 这有利于降低网损和维持电压稳定性。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(51407113); 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)资助项目。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈芳, 王玮, 徐丽杰, 等 (2012) 分布式电源接入对配电网电压变化的分析. *电力系统及其自动化学报*, **24**, 145-149.
- [2] 李文琦 (2012) 含分布式发电的配电网网损分析. 华北电力大学, 北京.
- [3] 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*, **28**, 56-60.
- [4] 裴晓娟, 王倩, 金英博 (2010) 分布式发电对配电网电压的影响. *电力学报*, **25**, 480-483.
- [5] 殷豪, 陈春泉, 彭显刚, 等 (2012) 分布式电源接入对配电网稳定性的影响研究. *东北电力技术*, **10**, 6-10.
- [6] Dulău, L.I., Abrudean, M. and Bică, D. (2013) Distributed generation technologies and optimization. *The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, 687-692.
- [7] 蒋毅 (2009) 分布式电源对配电网电压影响及优化配置研究. 西南交通大学, 成都.
- [8] 涂有庆 (2008) 含分布式发电的配电网网损研究. 湖南大学, 长沙.
- [9] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等 (2012) 主动配电网技术及其进展. *电力系统自动化*, **36**, 10-16.
- [10] Cazzato, F., Di Clerico, M. and Caneponi, G. (2013) The impact of distributed generation on the Italian distribution network: Upgrading of regulatory and technical rules in order to guarantee and improve reliability and efficiency of the electrical system. *22nd International Conference on Electricity Distribution*, 1297.
- [11] 闫丽梅, 谢一冰, 徐建军, 等 (2013) 改进的前推回代法在含分布式电源配电网计算中的应用. *西安交通大学学报*, **47**, 117-123.
- [12] 张立梅, 唐巍, 等 (2010) 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算. *电工技术学报*, **25**, 123-130.
- [13] Baran, M.E. and Wu, F.F. (1989) Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **4**, 1401-1407. <http://dx.doi.org/10.1109/61.25627>