

# 考虑分布式电源影响的配电网降损分析

孟晓芳<sup>1</sup>, 朴在林<sup>1\*</sup>, 王英男<sup>2</sup>, 王立地<sup>1</sup>

(1. 沈阳农业大学 信息与电气工程学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳市供电公司, 沈阳 110003)

**摘要:** 配电网的降损节能始终是电力行业业内人士关注的重要问题之一。该文研究通过分布式电源 (distributed generation, DG) 的配置实现配电网降损的方法。首先, 在不考虑 DG 接入最大容量限制的前提下, 在负荷均匀分布条件下的配电网, 以降损效果最明显为原则, 确定了配置 DG 的“2/3 原则”。对于负荷非均匀分布条件的配电网, 根据“2/3 原则”确定 DG 的初始配置点, 然后在满足功率平衡、节点电压、线路传输功率、DG 接入容量限制条件下, 以负荷的平均功率因数为基准, 以配电网的损耗最小为原则确定 DG 配置容量和位置。以实际配电网为例, 进行计算、分析和比较, 结果表明, 该文提出的方法在不同负荷情况下降损效果非常明显。利用该文提出的方法, 可以有效地实现配电网降损节能的目标, 而且在实际配电网中非常容易使用。

**关键词:** 分布式电源, 发电, 电源电路, 配电网, 降损

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.z1.019

中图分类号: TM727.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)- Supp.1-0128-04

孟晓芳, 朴在林, 王英男, 等. 考虑分布式电源影响的配电网降损分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(增刊 1): 128-131.

Meng Xiaofang, Piao Zailin, Wang Yingnan, et al. Analysis of distribution network loss considering influence of distributed generation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(Supp.1): 128-131. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

降损节能始终是配电网运行中关注的重要问题之一, 通常是通过无功优化来降低配电网的损耗<sup>[1-4]</sup>。在配电网中, 主要是通过控制电容器的投切实现无功优化<sup>[5-6]</sup>。随着世界各国对传统能源、环境以及可靠、易控的电力网建设关注的不断增加, 大量分布式电源 (distributed generation, 简称 DG) 接入了配电网, 出现了双向潮流分布, 传统的配电网发展为有源配电网<sup>[7-10]</sup>。环保意识和可持续发展是 DG 发展的关键动力, 这也极大的促进了可再生能源的发展<sup>[11-12]</sup>, 越来越重视可再生分布式发电<sup>[13]</sup>。DG 已经成为配电网中的重要电源<sup>[14]</sup>。

DG 在配电网中的应用影响了配电网的潮流分布、规划设计、损耗等<sup>[14-16]</sup>, DG 的配置影响配电网的运行<sup>[11]</sup>。DG 的配置是一个非线性规划问题<sup>[17]</sup>, 合理地配置 DG 可以减小配电网的

损耗, 而且配置位置和容量不同对降损效果不同<sup>[15,18]</sup>。但是, DG 接入配电网的容量受到约束条件的限制<sup>[19-20]</sup>。

本文研究目的是利用 DG 实现配电网降损节能, 首先研究负荷均匀分布条件下通过配置 DG 实现配网降损效果最明显的方法, 然后进一步研究负荷非均匀分布条件下配电网的降损方法, 根据降损要求配置 DG, 确定配电网降损方法。

## 1 负荷均匀分布条件下 DG 的配置

由于 DG 接入配电网的位置和容量不同对配电网损耗的影响是不一样的, 因此, 首先需要根据降损的要求确定 DG 的位置和容量, 使得配置 DG 后的降损效果最明显。同时满足节点电压和支路电流的限制条件。

设负荷沿配电线路均匀分布, 如图 1 中  $L_1$  所示, 负荷功率因数相同均为  $\cos\varphi$ , 线路总长度为  $L_0$ , 单位长度的负荷电流密度大小  $I_1$ , 则总负荷电流大小为  $I_0=I_1L_0$ 。

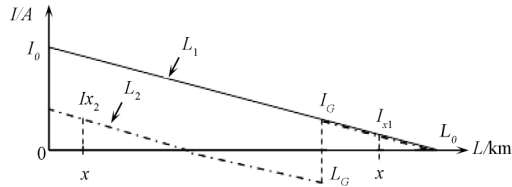
在不考虑 DG 接入最大容量限制的前提下, 设在  $L_G$  处接入 DG, DG 的电流大小为  $I_G$ , 功率因数也是  $\cos\varphi$ , 接入 DG 后的电流分布如图 1 中曲线  $L_2$  所示。

收稿日期: 2012-09-21 修订日期: 2013-04-21

基金项目: 辽宁省教育厅科学技术研究项目“辽宁农村可再生能源微网供电新模式仿真系统研究”(L2010500)

作者简介: 孟晓芳 (1974-), 女, 内蒙古察右前旗人, 主要研究方向为农村电力网规划和电能质量。沈阳 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 110161。Email: xfmeng123@126.com

\*通信作者: 朴在林 (1955-), 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农业电气化与自动化。沈阳 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 110161。Email: piaozl@china.com



注：I 为电流；x 为线路长度；L<sub>0</sub> 为线路总长度；I<sub>0</sub> 为总负荷电流大小；I<sub>G</sub> 和 L<sub>G</sub> 分别为接入 DG 的容量和位置；L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 分别为补偿前、后的电流分布曲线，I<sub>x1</sub> 和 I<sub>x2</sub> 分别表示线路 L<sub>G</sub> ~ L<sub>0</sub> 段、0 ~ L<sub>G</sub> 段各点电流分布。  
 Note: I is the current; x is the length of distribution line; L<sub>0</sub> is the total length of distribution line; I<sub>0</sub> is the total load current; I<sub>G</sub> and L<sub>G</sub> are respectively the size and the site of the interfaced DG; L<sub>1</sub> and L<sub>2</sub> are respectively the current flow curve before and after the DG interfaced; I<sub>x1</sub> and I<sub>x2</sub> are respectively the line current flow curve of the segments L<sub>G</sub> ~ L<sub>0</sub> and 0 ~ L<sub>G</sub>.

图 1 负荷电流分布曲线  
 Fig.1 Curve of load current

配置 DG 后线路中各点电流分布如下

$$I_{x1} = (L_0 - x)I_0 / L_0 = (1 - x / L_0) \cdot I_0 \quad (1)$$

$$I_{x2} = (1 - x / L_0) \cdot I_0 - I_G \quad (2)$$

式 (1)、式 (2) 中，I<sub>x1</sub> 和 I<sub>x2</sub> 分别为线路中 L<sub>G</sub> ~ L<sub>0</sub> 段和 0 ~ L<sub>G</sub> 段各点电流分布，A；L<sub>0</sub> 为线路总长度，km；I<sub>0</sub> 为总负荷电流大小，A；I<sub>G</sub> 为 DG 的电流大小，A。

配置 DG 后网损减小的数值 ΔP 为

$$\Delta P = \int_0^{L_G} I_{x1}^2 r dx - \int_0^{L_G} I_{x2}^2 r dx \quad (3)$$

$$= I_G L_G r (2I_0 - I_G - I_0 L_G / L_0)$$

式中，r 为线路单位长度的电阻，Ω/km；L<sub>G</sub> 为接入 DG 的位置，km。

为求出 ΔP 的极大值，令  $\frac{\partial \Delta P}{\partial I_G} = 0$ ， $\frac{\partial \Delta P}{\partial L_G} = 0$  可得

$$\begin{cases} L_G = 2L_0 / 3 \\ I_G = 2I_0 / 3 \end{cases} \quad (4)$$

即在负荷均匀分布条件下，为了降损效果最明显，可以根据式 (4) 所示的“2/3 原则”配置 DG。

## 2 负荷非均匀分布条件下 DG 的配置

### 2.1 DG 初始配置点的确定

负荷非均匀分布条件下，如图 2，图中 (1) ~ (29) 为节点编号，1 ~ 28 为支路编号。为使配置 DG 后损耗最小，可以参考式 (4) 确定初始配置点。

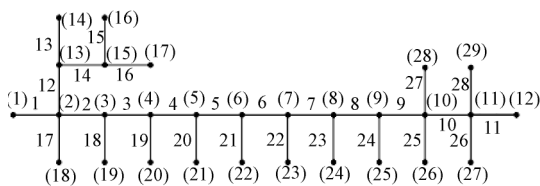


图 2 辐射式网络  
 Fig.2 Radial network

图 2 中支路 l，末端节点为 j，电流 I<sub>l</sub> 为

$$I_l = T_l I_N \quad (5)$$

式中，T<sub>l</sub> 为支路一道路关联矩阵的第 l 行<sup>[21]</sup>；I<sub>N</sub> 为配置 DG 前网络的节点注入电流，A。

若支路 l 电流大小 I<sub>l</sub> ≈ 2I<sub>0</sub>/3，则在节点 j 配置 DG，节点 j 即为 DG 的初始配置节点，DG 初始功率因数 cosφ 取为负荷的平均功率因数。

### 2.2 DG 配置容量和位置的确定

以 DG 的初始配置节点和 DG 初始功率因数 cosφ 为基准，设 ΔP<sub>loss</sub> 为配电网的有功损耗 (kW)，以损耗最小为原则确定 DG 配置容量和位置，目标函数为

$$\min \Delta P_{loss} = 10^{-3} \times 3 \times \left( \sum_{l=1}^b |I_l|^2 R_l \right) \quad (6)$$

在确定容量和位置的时，需要考虑功率平衡、节点电压、线路传输功率、DG 容量的限制，具体数学模型如下

$$\begin{cases} \sum P_L + \sum \Delta P - P_S - \sum P_{DG} = 0 \\ \sum Q_L + \sum \Delta Q - Q_S - \sum Q_{DG} = 0 \\ U_{\min,i} \leq U_i \leq U_{\max,i} \\ I_l \leq I_{l,\max} \\ P_{DG} \leq P_{DG,\max} \end{cases} \quad (7)$$

式 (6) 及式 (7) 中，R<sub>l</sub> 为配电网支路 l 的电阻，Ω；b 为网络的总支路数；P<sub>DG</sub> 和 Q<sub>DG</sub> 分别为 DG 所发出的有功 (kW) 和无功功率 (kvar)；P<sub>L</sub> 和 Q<sub>L</sub> 分别为负荷的有功 (kW) 和无功功率 (kvar)；P<sub>S</sub> 和 Q<sub>S</sub> 分别为系统输送的有功 (kW) 和无功功率 (kvar)；ΔP 和 ΔQ 分别为有功 (kW) 和无功功率损耗 (kvar)；U<sub>i</sub> 为节点 i 的电压 (kV)；U<sub>min,i</sub> 和 U<sub>max,i</sub> 分别为节点 i 允许的最小电压和最大电压 (kV)；I<sub>l</sub> 和 I<sub>l,max</sub> 分别为支路 l 的电流和支路 l 允许的最大电流 (A)；P<sub>DG,max</sub> 为安装 DG 的总容量 (kW)。

## 3 配电网损耗分析实例

本文以图 2 所示 10 kV 配电网以及其 2009 年负荷为例进行分析，计算时采用标幺制，功率和电压基准值分别取为 100 MVA 和 10.5 kV，网络的最大、最小总负荷的标幺值 (p.u.) 分别为 0.4711+j0.2918 和 0.3509+j0.2151。

根据以上所述方法，DG 配置容量、配置地点如表 1，DG 配置最大容量为总有功负荷的 30%。

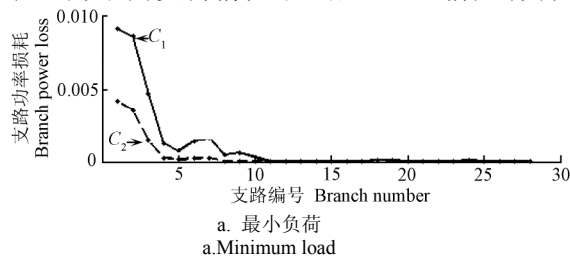
表 1 DG 配置位置及容量

负荷情况	配置 DG 节点编号	配置 DG 容量/p.u.		DG 功率因数
		有功功率	无功功率	
最小负荷	11	0.10527	0.0653	0.85
最大负荷	11	0.141345	0.08388	0.86

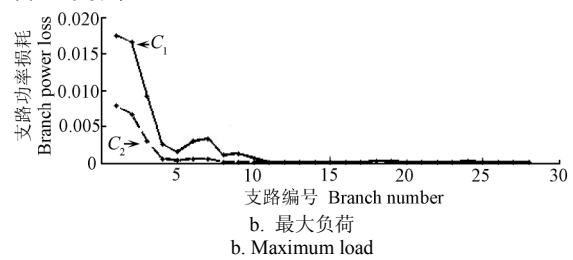
注 p.u. 表示各量的标幺值，无量纲。

配置 DG 前后的支路有功功率损耗比较如图 3 所示, 图 3a、3b 分别为最小、最大负荷时支路有功功率损耗的比较情况。

表 2 为不同负荷情况下, 配置 DG 前后有功



损耗以及网络最小节点电压的比较。从表中可以看出最小、最大负荷时, 配置 DG 后有功损耗下降比例均超过 63%。另外, 配置 DG 后节点电压明显提高。



注:  $C_1$  为配置 DG 前的支路功率损耗曲线;  $C_2$  为配置 DG 后的支路功率损耗曲线; p.u. 表示各量的标么值, 无量纲, 下同。

图 3 最小和最大负荷时支路有功功率损耗比较

Fig.3 Comparison of branch active power loss under the minimum load and the maximum load

表 2 有功损耗以及最小节点电压比较

Table 2 Comparison of active power loss and minimum node voltage

负荷情况	网络总有功损耗/p.u.			网络最小节点电压/p.u.			
	网络总有功损耗		下降率	配置 DG 前		配置 DG 后	
	配置 DG 前	配置 DG 后		节点编号	节点电压	节点编号	节点电压
最小负荷	0.029308	0.010622	63.76%	29	0.9538	25	0.9990
最大负荷	0.057399	0.020441	64.39%	29	0.9150	25	0.9788

## 4 结论与讨论

本文研究了利用 DG 实现配电网降损的方法, 首先在不考虑 DG 接入最大容量限制的前提下, 研究了负荷均匀分布条件下配电网降损效果最明显的方法, 然后分析负荷非均匀分布条件的配电网降损的方法, 通过实例分析结果可以得出以下结论:

1) 利用 DG 降低实际的配电网损耗时, 可以先根据“2/3 原则”确定 DG 的初始配置点, 然后在满足功率平衡、节点电压、线路传输功率、DG 容量的限制条件下, 以 DG 的初始配置节点和负荷的平均功率因数为基准, 以配电网的损耗最小为原则确定 DG 配置容量和位置;

2) 合理地配置 DG 可以降低配电网的损耗, 由实例结果比较可见, 配置 DG 后, 最大、最小负荷情况下, 有功损耗下降比例超过 63%, 而且配置 DG 改善了电压质量;

3) 今后的研究中, 可以同时考虑 DG 对配电网电压质量的改善, 进一步深入研究利用 DG 降低配电网的损耗。

### [参 考 文 献]

[1] 朴在林, 孟晓芳. 农村电力网规划[M]. 北京, 中国电力出版社, 2006.

[2] 孟晓芳, 朴在林, 王珏. 计及负荷不确定性的农网无功优化方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 182—187. Meng Xiaofang, Piao Zailin, Wang Jue. Reactive power optimal approach in rural power network considering load uncertainty[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 182—187. (in Chinese with English abstract)

[3] Zhu Jizhong, Cheung Kwok, Hwang Davis, et al. Operation strategy for improving voltage profile and reducing system loss[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 390—397.

[4] 朴在林, 谭东明, 郭丹. 10kV 配电线路无功优化智能系统的研究与实施[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 206—210. Piao Zailin, Tan Dongming, Guo Dan. Research and implementation on reactive power optimization intelligent system for 10 kV distribution line[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(12): 206—210. (in Chinese with English abstract)

[5] 谭东明, 朴在林, 郑维刚. 配电线路无功优化就地控制与系统控制效果比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 235—240. Tan Dongming, Piao Zailin, Zheng Weigang. Comparison of reactive power optimization control between local and system on distribution lines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(4): 235—240. (in Chinese with English abstract)

[6] 夏继红, 牛焕娜, 杨明皓. 计及配变无载调压分头位置的电压/无功优化方法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 118—122. Xia Jihong, Niu Huanna, Yang Minghao. Voltage and reactive power optimization algorithm incorporating off-load tap changer transformer in distribution systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(8): 118—122. (in Chinese with English abstract)

[7] Mohamed Y A-R I, Radwan A A. Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 352—362.

[8] He Jinwei, Li Yunwei, Munir Md Shirajum. A flexible harmonic control approach through voltage-controlled DG-Grid interfacing converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 444—455.

[9] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1—4, 31.

- Wang Chengshan, Wang Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(20): 1—4, 31. (in Chinese with English abstract)
- [10] Martins V F, Borges C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power System, 2011, 26(4):2164—2172.
- [11] Atwa Y M, El-Saadany E F, Salama M M A, Seethapathy R. Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 360—370.
- [12] 吴红斌, 蔡亮. 可再生能源分布式发电系统的经济调度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 287—292.  
Wu Hongbin, Cai Liang. Economic dispatching of renewable energy distribution generation systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(12): 287—292. (in Chinese with English abstract)
- [13] Konopinski R J, Vijayan P, Ajarapu V. Extended reactive capability of DFIGN wind parks for enhanced system performance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1346—1352.
- [14] Hong Yingyi, Pen Kuanlin. Optimal VAR planning considering intermittent wind power using markov model and quantum evolutionary algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2987—2996.
- [15] Gil H A, Joos G. Models for quantifying the economic benefits of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 327—335.
- [16] Atanasovski M, Taleski R. Power summation method for loss allocation in radial distribution networks with DG[J]. IEEE Transactions on Power System, 2011, 26(4): 2491—2499.
- [17] Abu-Mouti F S, El-Hawary M E. Optimal distributed generation allocation and sizing in distribution systems via artificial bee colony algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4):2090—2101.
- [18] 孟晓芳, 朴在林, 解东光, 等. 分布式电源在农村电网中的优化配置方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 243—247.  
Meng Xiao\_fang, Piao Zai\_lin, Xie Dong\_guang, et al. Distributed generation optimal placing approach in rural power network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 243—247. (in Chinese with English abstract)
- [19] Dent C J, Ochoa L F, Harrison G P. Network distributed generation capacity analysis using OPF with voltage step constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 296—304.
- [20] Shayani R A, Oliveira M A G. Photovoltaic generation penetration limits in radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power System, 2011, 26(3):1625—1631.
- [21] 孟晓芳, 刘文宇, 朴在林, 等. 基于网络拓扑分析的配电网潮流节点分析法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 140—145.  
Meng Xiaofang, Liu Wenyu, Piao Zailin, et al. A node analysis method of Load Flow in distribution network based on network topology analysis[J]. Power system technology, 2010, 34(4):140—145. (in Chinese with English abstract)

## Analysis of distribution network loss considering influence of distributed generation

Meng Xiaofang<sup>1</sup>, Piao Zailin<sup>1\*</sup>, Wang Yingnan<sup>2</sup>, Wang Lidi<sup>1</sup>

(1. The College of Information and Electric Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Shenyang Power Supply Corporation, Shenyang 110003, China)

**Abstract:** The loss reduction and energy saving of the distribution network is one of the most important issues to be concerned in the power industry all the time in the world. With the increased penetration of distributed generation (DG), there is a new opportunity for the problem of loss reduction and energy saving in distribution network at present. This paper studied the power loss reduction method by the configuration of the DG in the radial distribution network. From the simple radial distribution network with symmetrical load, this paper made further efforts to research on the problem of loss reduction in the actual network. First of all, without considering the penetration maximum capacity constraints of DG to be connected to a distribution network, and under the conditions of symmetrical load flow in the simple network, the mathematical models of current flow were established, the algorithm expression of the network loss reduction was determined after the DG configuration. Then, according to the rule of the clearest effect of power loss reduction after the DG configuration, the ‘2/3 principle’ was determined to configure the DG in the simple radial network. As to the actual radial distribution network with asymmetrical load flow, the algorithms of the branch current and the power loss were given firstly. And then, according to the ‘2/3 principle’ to determine the initial configuration point of DG, and under the constraint conditions of power balance, node voltage, transmission power, and DG capacity restriction, on the basis of load average power factor as the benchmark, the DG size and site was conformed by the minimum loss principles of the actual radial distribution network. The method proposed was applied to a real 10 kV distribution network, based on the data of the network in 2009, the DG was configured in the network, and the related calculation and analysis was implemented by the method given in this paper. By calculation, analysis and comparison, the results showed that the loss was significantly reduced under the different load conditions for used the method of this paper, and the voltage quality was obviously improved. By the proposed method in this paper, it is good to realize the goal of the loss reduction and energy saving in the distribution network effectively, and it is beneficial to improve the voltage. What’s more, it is very easy to use in the actual distribution network, and a new method is provided for energy saving and power loss reduction of the distribution network.

**Key words:** distributed power generation, power generation, power supply circuits, distribution network, loss reduction