

考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置

郑漳华, 艾芊, 顾承红, 蒋传文

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240)

Multi-objective Allocation of Distributed Generation Considering Environmental Factor

ZHENG Zhang-hua, AI Qian, GU Cheng-hong, JIANG Chuan-wen

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Suitable location and optimal sizing are very important subjects in the power system, especially smart grids. A new technique for determining optimal location and sizing of distributed generator was presented. Equivalent loss factor was proposed based on active and reactive power loss incremental factors. Through calculating these factors and comparing them, we could choose the node of maximal factor as the optimal location. Additionally, three indexes were introduced to evaluate distributed generation (DG) profits, namely voltage bettered index, power loss bettered index and environment bettered index. The DG sizing problem was turned into a multi-objective program to maximize DG benefits under certain constraints. Objective-approach and Sequential Quadric Programming methods were used to solve this formulation. The proposed technique was tested on IEEE 30-bus distribution system. The results illustrate the correctness and availability of the proposed algorithm.

KEY WORDS: distributed generation; multi-objective program; environmental factor; optimal sizing; smart grids

摘要: 分布式发电优化布置与定容问题是智能电网发展中所面对的一个重要课题。该文在节点有功、无功网损微增率基础上,通过负荷功率法将两者结合,提出等效网损微增率的概念。通过计算该微增率并对其进行排序,可确定分布式发电(distributed generation, DG)的最优安装位置,并且最小化输电线路网损。对于DG定容问题,该文同时考虑了有功网损、电压改善程度和环境改善程度这3个重要指标,将DG优化容量确定问题转化为一个多目标非线性规划问题。采用目标逼近和二次序列规划方法对提出的算法进行求解。算例结果表明,采用该方法确定DG在系统中的布置位置和容量可有效提高系统运行电压,降低有功网损,减少电厂排放的

污染气体。该方法对DG在规划阶段的选址和定容问题有着一定的实用价值。

关键词: 分布式发电; 多目标规划; 环境因素; 优化布置; 智能电网

0 引言

智能电网是指利用先进的技术提高电力系统在能源转换效率、电力利用率、供电质量和可靠性等方面性能的新型电网。随着人们对能源效率、可再生能源发电和发电可靠性等方面的研究的深入,以及政府和大收购集团对新能源发电装置、电力输送网络及支撑技术的投资,使得智能电网方面的研究日益成为电力系统中的一大热点^[1]。在发展智能电网的研究中,如何安全、可靠地接入各种可再生能源电源和分布式能源电源,是该研究所面临的一大挑战^[2]。

分布式发电是指直接布置在电网或分布在负荷附近的发电设施^[3]。其特点是电力的生产和使用在同一地点或限制在局部区域内,主要技术类型有风力发电、光伏发电、燃气轮机和燃料电池等。DG与传统的火力发电相比具有投资小、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等优点,近年来越来越受到人们的关注。分布式发电与集中发电方式相结合将是电力系统发展的趋势^[4-6],更是智能电网的一个重要的组成部分。

分布式发电接入配电网络,会对配电网络的潮流产生影响,具体影响的大小与分布式发电的容量大小、接入位置有很大关系^[7-10],因此,DG的优化布置和容量确定是在DG规划阶段中需要考虑的重要问题。一些国内外学者对其进行研究,取得了许多理论和实践方面的成果^[11-21]。文献[9]通过计算配电网潮流,研究燃料电池发电机组作为一种DG设备,

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2007AA05Z458); 上海市自然科学基金(08ZR1409700)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program(007AA05Z458)。

接入到配电网中对系统网损的影响,并通过选择不同的布置位置和容量,提出一种确定 DG 在配电网中的最佳布置位置的规则。文献[12]以最大化有功输出为目标函数,将 DG 的出力、线路的热稳定极限等作为约束,形成数学模型,然后利用线性规划方法求解该模型。文献[13]采用进化算法,从电压分布方面分析了 DG 安装容量的求解问题。文献[14]提出了一种用于放射型和网状配电网结构的 DG 最优布置策略,该策略采用尝试修正方法来减小系统的有功损耗,但利用该策略计算 DG 最优接入位置较为复杂。文献[15]提出了一种含 DG 的配电网扩展规划方法,并采用遗传算法对其进行求解。

本文通过负荷功率法将节点有功、无功网损微增率结合,提出等效网损微增率的概念。采用该概念指标计算得到的 DG 的最优配置位置,能确保 DG 接入配电网后系统的网损最小;另外,本文同时考虑有功网损、电压改善程度和环境改善程度这 3 个因素,将 DG 优化容量问题转化为多目标非线性规划问题,并采用目标逼近和二次序列规划方法对提出的算法进行求解。算例结果表明,采用本文方法确定 DG 在系统中的布置位置和容量,可以有效改善系统运行情况,减小对环境的污染,同时提高经济效益。

1 分布式发电优化布置

电力系统总的有功网损可以表示为

$$L = \sum_j G_{ij} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (1)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压值; G_{ij} 为节点 i 与 j 之间的节点导纳矩阵元素的实部; θ_i 为节点 i 的电压相角; L 为全网的有功总损耗。分别对式(1)的节点电压幅值和相角求偏导,可得:

$$\frac{\partial L}{\partial U_i} = 2 \sum_{j=1}^N G_{ij} [U_i - U_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_i} = 2 \sum_{j=1}^N G_{ij} U_i U_j \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (3)$$

另外,根据系统潮流方程可得到

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P}{\partial U} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial P} \\ \frac{\partial L}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (4)$$

综合式(2)~(4)可求出网损对节点有功、无功的微增率:

$$k_{Pi} = \frac{\partial L}{\partial P_i} = f_1(P, Q, U, \theta) \quad (5)$$

$$k_{Qi} = \frac{\partial L}{\partial Q_i} = f_2(P, Q, U, \theta) \quad (6)$$

式中 k_{Pi} 、 k_{Qi} 分别为节点 i 的有功和无功网损微增率。网损微增率反映出一定的系统运行方式下,节点 i 增加单位负荷引起的网损增量。如果节点的网损微增率数值为负,说明在此节点从电网汲取功率有利于降低网损;如果节点的网损微增率数值为正,则相反。

此外,假设节点 i 的功率因数为 θ_i ,考虑到节点有功、无功负荷对网损的贡献率,通过 θ_i 将 k_{Pi} 和 k_{Qi} 等效为

$$dL_i = \frac{\partial L}{\partial P_i} (\cos \theta_i)^2 + \frac{\partial L}{\partial Q_i} (\sin \theta_i)^2 \quad (7)$$

式中 dL_i 为节点 i 的等效网损微增率。等效网损微增率综合了节点有功、无功负荷对有功网损的贡献。在系统中选择节点安装 DG 时,可以通过等效网损微增率指标对节点进行排序,选出绝对值较大的节点安装。应该注意的是,系统中有些节点不能够或者不适宜安装 DG,应将其从系统中剔除,再对其他节点重新排序、选择。

2 分布式发电优化容量确定

2.1 电压改善指标

DG 的主要优点是可以改善电网的电压分布,维持母线电压在一个可接受的范围内。定义电网电压改善率指标为安装 DG 后的系统电压指标与未安装 DG 时的系统电压指标的比值。假设系统节点 i 的电压幅值为 U_i , 节点负荷为 L_i , k_i 为各节点的权重因子, N 为系统节点数。 k_i 应满足:

$$\sum_{i=1}^N k_i = 1 \quad (8)$$

对于整个系统的电压分布,定义电压指标 $I_{ui}^{[22]}$ 为

$$I_{ui} = \sum_{i=1}^N U_i L_i k_i \quad (9)$$

考虑到安装 DG 后对系统电压分布的影响,定义电压改善指标 I_{ubi} 为

$$I_{ubi} = I_{uiw} / I_{uiwo} \quad (10)$$

式中 I_{uiw} 和 I_{uiwo} 分别为安装 DG 和未安装 DG 时的 I_{ui} 。通过分析该指标,就可以确定系统安装 DG 后,对系统电压分布的影响程度;另外,可以通过控制各个节点的权重因子,将节点设置成为不同的重要程

度。负荷节点越重要，权重因子越大。

2.2 网损改善率指标

网损的大小主要与系统的支路电阻和节点电压有关，由此可见，适当的接入DG可以有效地改变系统电压的分布，从而使系统网损降低。考虑到安装DG后对系统网损的影响，定义网损改善率指标 I_{plbi} 为

$$I_{plbi} = P_{lwo} / P_{lw} \quad (11)$$

式中 P_{lwo} 、 P_{lw} 分别为未安装DG和安装DG后的系统网损。网损改善率指标能有效地反应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。

2.3 环境改善率指标

与传统火力发电相比，DG排放很少量的污染气体，有较大的社会效益。定义环境改善指标， I_{ebi} 为未安装DG和安装DG后，系统排放的污染气体量的比值^[22]。

第 i 种污染气体排放指标 I_{ebii} 可定义为

$$I_{ebii} = E_{woi} / E_{wi} \quad (12)$$

式中 E_{wi} 、 E_{woi} 分别为未安装DG和安装DG后，系统排放的第 i 种污染气体(CO_2 , SO_2 , NO_x)的量。系统污染气体排放量与系统的出力和机组的运行特性有关，第 i 种污染气体的排放量可计算如下：

$$E_{wi} = \sum_{j=1}^B P_{wj} E_{ij} + \sum_{k=1}^H P_{dgk} E_{dgi} \quad (13)$$

$$E_{woi} = \sum_{j=1}^B P_{woj} E_{ij} \quad (14)$$

式中： B 为系统中传统发电机的台数； H 为系统中安装的DG的台数； P_{wj} 、 P_{woj} 为安装和未安装DG时候，系统中第 j 台传统发电机的有功出力； E_{ij} 为第 j 台传统发电机发出单位有功出力时所释放的第 i 种污染气体的量； E_{dgi} 为第 k 台DG发出单位有功出力时所释放的第 i 种污染气体的量； P_{dgk} 为第 k 台DG发出的有功功率。

由于发电厂向大气中排放多种污染气体，因此，定义包含所有污染气体的综合指标 I_{ebi} 为

$$I_{ebi} = \sum_{i=1}^T z_i I_{ebii} \quad (15)$$

式中： T 为总的污染气体类型数目； z_i 为第 i 种污染气体的权重因子， z_i 应满足：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^T z_i = 1 \\ 0 \leq z_i \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

2.4 DG 优化容量模型

在 DG 接入到系统前，需要确定其容量。DG 的容量对系统的经济性、沿线电压分布、线路网损等都有较大影响。为满足系统运行的稳定性、经济性、环境条件的制约，本文将考虑环境因素的 DG 优化容量确定问题转化为有等式约束和不等式约束的多目标规划问题，其目标函数为

$$L_{obj} = \max(I_{ubi}, I_{plbi}, I_{ebi}) \quad (17)$$

等式约束为节点潮流方程：

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} + Q_{Ci} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中： P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为发电机有功出力、无功出力； P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为发电机有功、无功负荷； Q_{Ci} 为无功补偿容量； U_i 为节点电压大小； G_{ij} 、 B_{ij} 为系统导纳； δ_{ij} 为节点电压相角差。

由于DG的接入必然引起馈线中传输有功、无功数量和方向发生变化，因此DG的定容必须考虑DG对线路负载能力和配电网潮流的影响。根据配电网电压分布的要求，节点电压要在一定的范围内变化；线路有一定的热稳定极限，故线路上流过的功率不能大于某个值；此外，安装DG会对系统的运行、同步和稳定等方面产生一定的影响，例如增加故障率及暂态不稳定性等，因此DG的定容问题还需要考虑到系统所能接受的最大穿透功率的限制^[23-24]。考虑到上述限制，形成不等式约束为

$$\begin{cases} P_{xdgi} \leq P_{dgi} \leq P_{sdgi}, i = 0, \dots, N_{dg} \\ Q_{xdgi} \leq Q_{dgi} \leq Q_{sdgi}, i = 0, \dots, N_{dg} \\ U_{xi} \leq U_i \leq U_{si}, i = 0, \dots, N_L \\ \theta_{xi} \leq \theta_i \leq \theta_{si}, i = 0, \dots, N_L \\ P_{xij} \leq P_{ij} \leq P_{sij}, i = 0, \dots, N_b \\ f_{dg}^{\min} \leq f_{dg} \leq f_{dg}^{\max} \\ \sum_{i=1}^{N_{dg}} P_{dgi} \leq \delta \sum_{i=1}^{N_{dg}} P_{Li} \end{cases} \quad (19)$$

式中： N_{dg} 为DG的台数； N_L 为节点数； N_b 为支路数； P_{dgi} 为第 i 台DG有功出力； θ_i 为节点 i 的电压相角； P_{ij} 为线路的传输功率，变量添加下标 x 、 s 分别表示该变量的下限和上限； f_{dg} 为DG的运行功率因数； δ 为穿透功率系数。

2.5 目标逼近解法

采用目标逼近方法来求解多目标规划问题的方法是，已知一组对象集：

$$F(x) = \{F_1(x), F_2(x), \dots, F_m(x)\} \quad (20)$$

期望的设计目标值为

$$F^* = \{F_1^*, F_2^*, \dots, F_m^*\} \quad (21)$$

在期望的目标值附近,两者之间的差值大小可以通过设置一个权重系数 $w=(w_1, w_2, \dots, w_m)$ 来控制。其标准形式为

$$\begin{cases} L_1 = \min_{x \in \Omega, \gamma \in R} \gamma \\ \text{s.t. } F(x) - w\gamma \leq F^* \end{cases} \quad (22)$$

式中:引入变量 γ ,构造了松弛变量 $w \times \gamma$,它使得优化结果能够更好的逼近预设定的目标值; Ω 为可行解空间。在采用非线性多目标规划方法来求解时,式(22)可表示为

$$L_2 = \min_{x \in \Omega} \max \left[\frac{F(x) - F^*}{w} \right] \quad (23)$$

本文采用二次序列法,给出以下指标函数对式(23)进行逼近:

$$\psi(x, \gamma) = \gamma + \sum_{i=1}^m r_i \cdot \max\{0, F_i(x) - w_i \gamma - F_i^*\} \quad (24)$$

式中 r_i 为拉格朗日乘子。为增加程序的鲁棒性,可将式(24)修正如下:

$$\psi(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^m r_i \cdot \max\{0, F_i(x) - w_i \gamma - F_i^*\}, w_i = 0 \\ \sum_{i=1}^m \max\left\{\frac{F(x) - F^*}{w_i}\right\}, w_i \neq 0 \end{cases} \quad (25)$$

采用二次序列规划法即可求解上述非线性规划问题。

3 算例分析

3.1 算例系统简介

本文利用IEEE 30节点系统在Matlab 2006上进行算例计算,分析DG在接入环状复杂系统情况下优化安装位置和容量的确定,系统结构如图1所示。该系统包括6台发电机(节点1为平衡节点)、4台变压器、4个无功补偿装置,有功负荷为272.8 MW,无功负荷为124.3 MW。

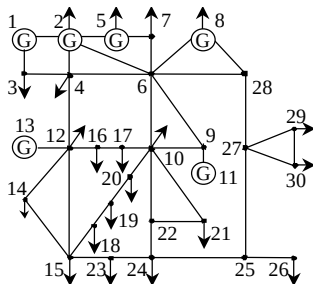


图1 IEEE 30节点标准系统结构
Fig. 1 Structure of IEEE 30-bus system

3.2 DG的优化布置

采用2.5节中叙述的方法,求得IEEE 30节点测试系统的等效网损微增率,如图2所示。由图2可知,节点30的等效网损微增率 dL 绝对值最大为0.174 0,其次为节点29(0.1546)、节点26(0.1590)和节点5(0.147 5), n 表示母线号。可通过比较,选择合适的节点安装DG。如果某些节点不能够或者不允许安装DG,可将其从中排除,重新排序、选择。图3绘制了DG安装在不同节点处系统对应的有功网损 L 。比较图2、3可知,图3中曲线的变化趋势与图2描述的结果大致相似,这表明了本文方法的有效性。

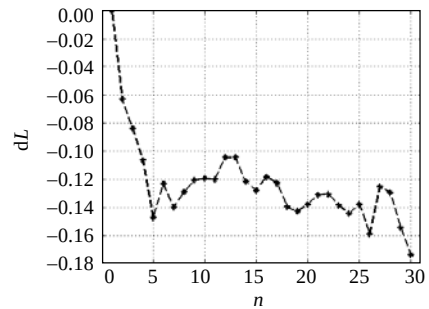


图2 系统网损微增率因子比较
Fig. 2 Comparison of system incremental loss factors

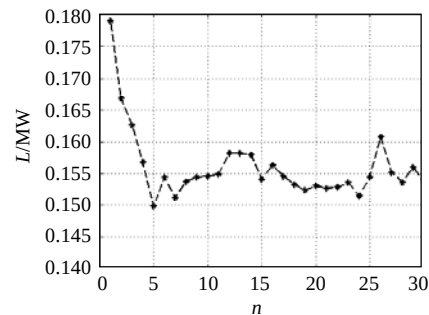


图3 DG安装在不同节点处的有功网损比较

Fig. 3 Corresponding power loss of different DG placement

3.3 DG优化容量确定

DG的安装位置选定,还需要考虑众多的因素,如系统效益、系统电压分布、自然资源的分布、负荷的分布、系统网架结构、环境因素等。本文将这些因素作为DG最优容量确定问题中的优化约束处理来考虑。将一台DG安装在测试系统的节点30上,为简化问题,假设DG释放的污染气体量很少,可以忽略不计;假设各节点电压权重相等。通过多目标优化方法,求解本文建立的数学模型,得出以下结果。表1为各台发电机出力所排放的3种主要污染气体量。

假设传统发电厂的3种主要污染气体权重相

表 1 IEEE 30 节点系统发电机污染气体量
Tab. 1 Emission of generators in IEEE 30-bus system

发电机号	母线号	CO ₂ / (kg/(MW·h))	SO ₂ / (kg/(MW·h))	NO _x / (kg/(MW·h))
1	1	850	1.0	1.2
2	2	750	0.8	1.0
3	5	900	1.1	1.3
4	8	800	1.2	1.2
5	11	820	1.1	1.0
6	13	780	1.1	1.1

等。利用潮流与优化规划计算，可分别计算出在未安装 DG 时和安装 DG 后系统的电压指标、有功网损和污染气体量，计算结果如表 2 所示。

表 2 IEEE 30 节点系统结果
Tab. 2 Results of IEEE 30-bus system

情况	电压 指标	有功 网损/ MW	污染气体量		
			CO ₂ / (kg/(MW·h))	SO ₂ / (kg/(MW·h))	NO _x / (kg/(MW·h))
未安 DG	0.107 1	17.89	2 520.9	2.932 9	3.535 4
安装 DG	0.108 6	15.03	2 118.0	2.458 8	2.966 6

求解得出的DG出力为有功功率：0.445 5 MW，无功功率：0.028 1 Mvar；3 个改善指标的值分别为 $I_{ubi}=1.013\ 7$ 、 $I_{plbi}=1.190\ 2$ 、 $I_{ebi}=1.190\ 5$ 。算例计算结果(见表 2)表明，安装DG后系统的有功网损、3 种污染气体量比安装DG前都有所降低，节点电压指标由 0.107 1 上升到 0.108 6，网损由 17.89 MW 降低到 15.03 MW。由表 3 可看出，原系统运行的电压较低点，如节点 30 的电压由 0.979 5 pu 提高到 1.100 0 pu，节点 26 的电压由 0.982 4 pu 提高到 1.011 5 pu。由此可见，采用本文方法确定DG的容量，可有效改善系统的运行条件，提高系统电压的运行水平，提高系统的稳定性和经济效益。

表 3 IEEE 30 节点电压结果
Tab. 3 Voltage value of IEEE 30-bus system

节点	未安装 DG 时 电压/pu	安装 DG 时 电压/pu	节点	未安装 DG 时 电压/pu	安装 DG 时 电压/pu	节点	未安装 DG 时 电压/pu	安装 DG 时 电压/pu
1	1.060 0	1.060 0	11	1.082 0	1.100 0	21	1.007 6	1.019 7
2	1.045 0	1.046 1	12	1.049 1	1.056 4	22	1.008 1	1.020 4
3	1.018 8	1.028 9	13	1.071 0	1.074 3	23	1.009 2	1.021 6
4	1.009 5	1.021 4	14	1.031 7	1.039 6	24	0.996 9	1.013 1
5	1.010 0	1.015 0	15	1.024 8	1.034 4	25	1.000 3	1.028 9
6	1.007 8	1.022 9	16	1.029 1	1.038 6	26	0.982 4	1.011 5
7	1.000 9	1.012 0	17	1.017 8	1.028 7	27	1.011 2	1.047 8
8	1.010 0	1.027 5	18	1.010 8	1.021 3	28	1.003 8	1.025 2
9	1.038 1	1.052 6	19	1.005 7	1.016 6	29	0.991 1	1.067 0
10	1.020 1	1.031 8	20	1.008 5	1.019 6	30	0.979 5	1.100 0

4 结论

在智能电网发展中，如何安全、可靠地接入各种可再生能源电源和分布式发电是所面临的一大

挑战。针对这一问题，本文提出了解决 DG 在规划阶段的选址和定容问题的新方法，检验结果表明了新方法的有效性和经济性。经过算例分析可知：

1) 本文提出的转化网损微增率方法可有效确定在放射型配网中 DG 的优化布置问题，有利于降低系统有功网损，改善系统的稳态运行的经济性。

2) 本文同时考虑评价 DG 效益的电压、网损和环境效益 3 个指标，利用多目标规划方法求解提出的数学模型，计算结果显示，本文提出的算法可以有效的改善系统的运行条件，提高系统运行的稳定性和经济效益。

参考文献

[1] 李亚楼, 周孝信, 林集明, 等. 2008 年 IEEE PES 学术会议新能源发电部分综述[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 1-7.
Li Yalou, Zhou Xiaoxin, Lin Jiming, et al. A review of new energy power generation part in 2008 IEEE PES general meeting[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 1-7(in Chinese).

[2] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7(in Chinese).

[3] Dugan R C, McDermott T E. Distributed generation[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(2): 19-25.

[4] Hadjsaid N. Modern power system as a critical infrastructure [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA, 2007.

[5] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.
Liang Youwei, Hu Zhijian, Chen Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75(in Chinese).

[6] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31.
Zheng Zhanghua, Ai Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in china[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31(in Chinese).

[7] 裴玮, 盛鹏, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.
Pei Wei, Sheng Kun, Kong Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157(in Chinese).

[8] Zhang W Y, Zhu S Z, Zheng J H, et al. Impacts of distributed generation on electric grid and selecting of isolation transformer [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.

[9] Kashem M A, Le A D T, Negnevitsky M, et al. Distributed generation for minimization of power losses in distribution systems[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006.

[10] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电

- 场暂态电压稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 25-31.
- Chi Yongning, Wang Weisheng, Dai Huizhu. Study on transient voltage stability enhancement of grid-connected wind farm with doubly fed induction generator installations[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 25-31(in Chinese).
- [11] Griffin T, Tomsovic K, Secrest D, et al. Placement of dispersed generation systems for reduced losses[C]. The 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2000.
- [12] Keane A, O'Malley M. Optimal allocation of embedded generation on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1640-1646.
- [13] Rahman T K A, Rahim S R A, Musirin I. Optimal allocation and sizing of embedded generators[C]. Power and Energy Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004.
- [14] Caisheng W, Nehrir M H. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2068-2076.
- [15] 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和定容[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 distributed generation in distribution network expansion planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43(in Chinese).
- [16] AlHajri M F, El-Hawary M E. Optimal distribution generation sizing via fast sequential quadratic programming[C]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Montreal, Canada, 2007.
- [17] Khoa T Q D, Binh P T T, Tran H B. Optimizing location and sizing of distributed generation in distribution systems[C]. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, USA, 2006.
- [18] Celli G, Ghiani E, Mocci S, et al. A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 750-757.
- [19] 唐勇俊, 刘东, 阮前途, 等. 计及节能调度的分布式电源优化配置及其并行计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 92-97.
- Tang Yongjun, Liu Dong, Ruan Qiantu, et al. Optimal allocation of distributed generation and its parallel computation considering energy-saving dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 92-97(in Chinese).
- [20] 顾承红, 艾芊. 配电网中分布式电源最优布置[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(11): 1896-1900.
- Gu Chenghong, Ai Qian. The optimal layout of distributed generation in distribution system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(11): 1896-1900(in Chinese).
- [21] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 13-17.
- Hu Hua, Wu Shan, Xia Xiang, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17(in Chinese).
- [22] Chiradeja P, Ramakumar R. An approach to quantify the technical benefits of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 764-773.
- [23] Van T, Dommelen D, Belmans R. Penetration level of distributed energy resources with anti-islanding criteria and secure operation of power system[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006.
- [24] Morren J, Haan S W H. Maximum penetration level of distributed generation without violating voltage limits[C]. IET-CIRED Smart Grids for Distribution, Frankfurt, USA, 2008.



郑漳华

收稿日期: 2008-12-06。

作者简介:

郑漳华(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电、微电网、电力系统优化计算, Mentis001@126.com;

艾芊(1969—), 男, 副教授, 研究方向为电能质量、人工智能及其在电力系统中的应用、电力系统元件建模、电力系统继电保护、故障诊断与定位, aiqian@sjtu.edu.cn;

顾承红(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定和电力系统优化计算。

(责任编辑 刘浩芳)