

Siting and Sizing of Distributed Generation in Distribution Network Planning

Xuanzi Chen, Xiangyang Zhao

School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing
Email: qqwx_xz@163.com

Received: Jun. 4th, 2013; revised: Jul. 4th, 2013; accepted: Jul. 15th, 2013

Copyright © 2013 Xuanzi Chen, Xiangyang Zhao. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Xuanzi Chen, Xiangyang Zhao. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: This paper analyses and studies the Distributed Generation (DG) siting and sizing in micro-grids from the view of reducing the distribution network loss, increasing the distribution network voltage stability margin and improving the distribution network voltage quality. A multi-objective programming model, which takes into account the above three indicators, is established. By using the fuzzy set theory, we transform the multi-objective optimization, which is conflicting and has different dimensions, to single-objective optimization. By maximizing the overall satisfaction, we can achieve overall optimization results. Finally, according to environmental requirements and annual energy costs, this paper guides the economic configuration of various types of DG. Adopting particle swarm optimization (PSO) with inertia weight can effectively improve the global convergence ability. This paper analyzes and verifies the correctness and effectiveness of the proposed scheduling model and optimization algorithm with an example.

Keywords: Distributed Generation; Siting and Sizing; Multi-Objective Optimization; Fuzzy Set Theory; Particle Swarm Optimization

配电网规划中分布式电源的选址定容研究

陈眩姿, 赵向阳

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京
Email: qqwx_xz@163.com

收稿日期: 2013年6月4日; 修回日期: 2013年7月4日; 录用日期: 2013年7月15日

摘要: 本文从降低配电网系统网损、提高电压稳定裕度及改善电压质量多个方面综合考虑, 研究配电网规划中分布式电源(DG)的选址定容问题, 建立了基于上述三个指标的优化规划模型。运用模糊集理论将量纲不同、相互冲突的多目标优化问题单目标化, 通过最大化总体满意度来达到整体优化的效果。最后依据环境要求及年发电成本指导不同类型 DG 的经济配置。采用带惯性权重的粒子群算法求解, 能有效提高算法的全局收敛能力。以一个算例仿真分析验证模型和算法的正确性与有效性。

关键词: 分布式电源; 选址定容; 多目标优化; 模糊集理论; 粒子群算法

1. 引言

在大力发展智能电网的背景下, 分布式电源以其环保、高效、灵活等优点引起电力行业的广泛关注^[1],

是目前应对能源危机和环境污染的有效方式。分布式发电一般包括可再生能源发电(风能、太阳能)和不可再生能源发电(微型燃气轮机、燃料电池等)。DG 的接

入对配电网节点电压、线路潮流、短路电流、供电可靠性等都有影响，其影响程度与 DG 的接入位置及容量密切相关^[2,3]。因此，合理有效地选择配电网中 DG 的接入位置和容量十分重要。

目前，国内外学者从许多角度对 DG 选址定容问题进行了研究。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。上述文献多从单目标优化角度进行 DG 的规划研究，具有一定的局限性，不能实现整体协调优化。

本文将重点集中在配电网的电能质量方面，建立了配电网系统网损最小、静态电压稳定裕度最大、节点电压偏差最小的多目标 DG 规划模型，采用基于模糊集理论的多目标单一化求解方法，实现了各目标量纲不同而难以处理这一问题。通过采用带惯性权重的粒子群算法对某 10 节点配电系统算例的仿真分析，验证了所提模型、算法的正确性及有效性。

2. 配电网 DG 规划模型

2.1. 含 DG 的配电网潮流计算

在含 DG 的配电网潮流计算中，DG 所采用的模型可简化为 PV、PQ、PQ(V)等节点类型，为简化处理，本文将其看成是具有恒定功率因数的 PQ 节点。由于 DG 一般靠近负荷中心，本文假定 DG 直接安装于负荷节点上。计及分布式电源的配电网规划必须考虑 DG 对线路负载能力和配电网潮流的影响。由于配电网多为辐射状，且采用开环运行方式，因此，前推回代法^[8]以其较好的线性收敛性能及计算速度快等优点成为目前应用最广泛的潮流算法之一。本文采用前推回代法进行含 DG 的配电网潮流计算。

2.2. 目标函数

1) 网络损耗最小

分布式电源的接入一般会减少支路潮流流动，从而减少网损。但 DG 接入容量过高或位置不当时，系统网损也有可能增加。配电网网损最小的目标函数为：

$$\min f_1 = \min P_{loss} = \min \sum_{i=1}^L |I_i|^2 R_i \quad (1)$$

其中， I_i 为支路电流， L 为支路数； R_i 为支路电阻。

2) 节点电压偏差最小

节点电压幅值是衡量系统安全和电能质量的一个重要指标。以节点电压偏差最小作为目标函数进行规划，可以使得优化后系统各节点电压非常接近指定电压，从而保证整个配电网系统具有较好的电压水平，改善电压质量。系统节点电压偏差最小目标函数为^[9]：

$$\min f_2 = \min \Delta U = \min \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_i - U_{ispec}}{U_{imax} - U_{imin}} \right)^2 \quad (2)$$

式中， U_{ispec} 为节点 i 指定电压幅值， U_{imax} 和 U_{imin} 分别为节点 i 规定电压幅值上下限， U_i 为节点 i 电压幅值， n 为配电网节点数。

3) 静态电压稳定裕度最大

电力系统电压稳定性^[10]是指系统维持电压的能力。由于配电网负荷变化的复杂性，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电压的稳定性。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。在 DG 规划阶段，建立以配电网静态电压稳定裕度最大为目标的规划模型，可以提高系统运行的稳定性及承受负荷增长的能力。

配电网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^[10]，即

$$L = \max \{L_1, L_2, \dots, L_B\} \quad (3)$$

式(3)中， B 为系统支路数， L_1, L_2, \dots, L_B 为各支路的静态电压稳定指标。当 $L = 1.0$ 时，系统处于临界崩溃状态。

定义整个系统的静态电压稳定裕度为：

$$M = 1 - L \quad (4)$$

所以系统静态电压稳定裕度最大等价于：

$$\min f_3 = \min L \quad (5)$$

2.3. 约束条件

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - P_i(V, \theta) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i(V, \theta) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{i\min} \leq P_{Gi} \leq P_{i\max} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{Gi} \leq 0.4 \sum_{i=1}^N P_{Loadi} \quad (8)$$

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (9)$$

$$I_j \leq I_{j\max} \quad (10)$$

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; $P_{x\min}$ 、 $P_{x\max}$ 为 DG 待选安装节点范围; $U_{i\min}$ 、 $U_{i\max}$ 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。

2.4. 基于模糊集理论的多目标单一化

配电网系统的网损、静态电压稳定裕度、节点电压偏差有时是相互矛盾、互相制约的,通常意义下的最优解并不存在,不可能取得使各子目标函数同时达到最优的解,只能得到一组满足各约束条件的而相对于不同目标互有优劣的有效解。为了协调各子目标函数之间的关系,常用的处理办法是权重系数法和模糊方法。但采用权重系数法时,权重系数往往难以确定,优化结果还常常达不到整体优化的效果。而模糊集理论则特别适合描述不确定性及不同量纲的多目标优化问题。

本文采用隶属度函数将各子目标模糊化,通过最大满意度法^[11]将多目标问题单一化。常用的隶属度函数有幂指数、双曲线、线性和分段线性函数^[12]等,由于双曲线和幂指数具有非线性的特点会造成求解困难。本文选择降半梯形分段函数作为隶属度函数^[13],其表达式如下:

$$\mu(F) = \begin{cases} 1, & F \leq F^S \\ 1 - \frac{F - F^S}{F^M - F^S}, & F^S < F < F^M \\ 0, & F > F^M \end{cases} \quad (11)$$

式中, F 是待优化的单目标, F^S 为相应指标隶属度函数的期望值,取为以 F 为优化目标时的最优值。 F^M 为相应隶属度函数的容许极限值,取没有进行优化时 F

指标的初始值。由式(11)可知,通过对目标函数进行模糊处理后,目标函数转化为在 $[0,1]$ 之间的隶属度,这相当于对目标函数进行了归一化处理。隶属度的大小反映了决策者对优化结果的满意程度,其值越大,表示决策者对优化结果越满意。

为实现各优化子目标尽可能达到最优,通常采用最大满意度的方法,定义总体满意度为:

$$S = \min(\mu_1(F_1), \mu_2(F_2), \dots, \mu_N(F_N)) \quad (12)$$

因此,原多目标优化问题可以转化为在满足相应约束条件下使总体满意度 S 最大化这一问题,其具体表达形式如下:

$$\max S = \min(\mu_1(F_1), \mu_2(F_2), \dots, \mu_N(F_N)) \quad (13)$$

将最大化问题转化为最小化问题:

$$\max(-S) = -\min(\mu_1(F_1), \mu_2(F_2), \dots, \mu_N(F_N)) \quad (14)$$

3. 分布式电源选址定容求解方法

3.1. 粒子群优化算法

粒子群优化算法^[14]是于 1995 年提出的基于群体智能的随机优化算法,优势在于算法简单、易于实现且需要调整的参数较少,同时有着深刻的智能背景,适合于求解非线性的复杂优化问题。

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,其中第 i 个粒子的位置和速度可表示为一个 D 维向量 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ 和 $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$, 其中, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为种群规模。第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置为 $x_{pi} = [x_{pi1}, x_{pi2}, \dots, x_{piD}]$, 该位置适应度值为 $pbest_i$, 称为个体极值。整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为 $x_g = [x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{gD}]$, 该位置适应度值为 $gbest$, 称为全局极值。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:

$$\begin{aligned} v_{id}^{k+1} &= \omega v_{id}^k + c_1 r_1^k (pbest_{id}^k - x_{id}^k) \\ &+ c_2 r_2^k (gbest^k - x_{id}^k) \end{aligned} \quad (15)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (16)$$

式中, d 表示 D 维空间中的第 d 维, $d = 1, 2, \dots, D$; 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; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数。粒子速度受最大速度 v_{max} 的限制 ($v_{id}^k \leq v_{max}$), v_{max} 可以根据粒子的取值区间长度来确定。惯性权重 ω 起着均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, 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 表达式如下:

$$w_k = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \times k \quad (17)$$

式中, w_{max} 、 w_{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。

3.2. 基于粒子群算法的 DG 规划求解步骤

基于粒子群优化算法的 DG 优化规划求解具体步骤如下, 其流程图如图 1 所示。

(1) 初始化。输入配电网的网络参数、确定约束条件和算法参数等。本文选取的 PSO 种群规模为 50,

$$c_1 = 2, \quad c_2 = 2, \quad \omega_{max} = 0.9, \quad \omega_{min} = 0.4。$$

(2) 设定迭代次数 $k=1$, 在粒子位置和速度约束范围内, 随机初始化粒子的位置和速度。

(3) 基于前推回代法潮流计算程序和 DG 优化规划模型, 计算各粒子的目标函数值, 记录其中最小的目标函数值为 pBest(个体极值), 所有粒子目标函数值向量 FPbest、全局最优粒子的目标函数值 gBest(全局极值)和全局最优粒子向量 Best。

(4) 更新迭代次数 $k = k + 1$, 由式(17)计算 ω , 然后通过式(15)、(16)更新各粒子速度和位置。

(5) 重新计算各粒子目标函数值, 对每个粒子而言, 不断更新其个体极值 pBest, 对全局所有粒子而言, 不断更新全局极值 gBest 及对应的全局最优粒子向量 Best。

(6) 重复步骤(4)到(5), 直至达到最大迭代次数。

(7) 输出最优粒子向量 Best 和最小的目标函数值 gBest。

4. 算例分析

如图 2 所示为某 10KV10 节点配电网系统^[15]。

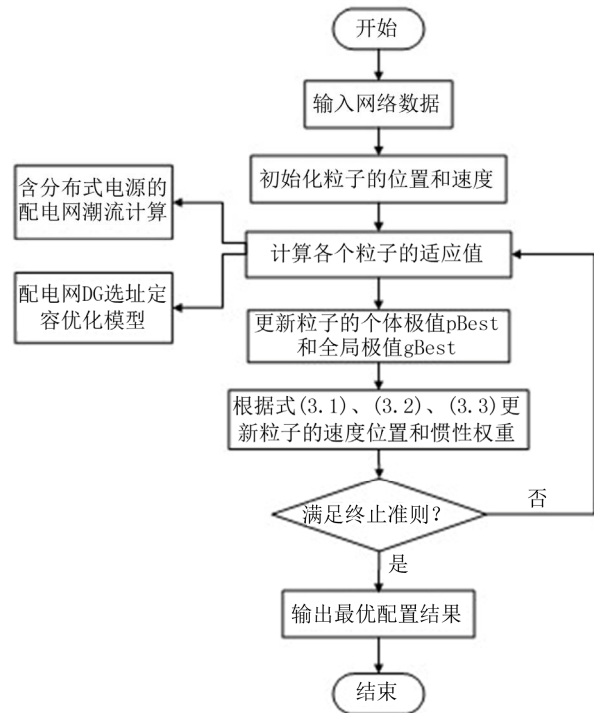


Figure 1. Flow chart of optimization based on PSO
图 1. 基于改进粒子群优化算法的 DG 规划流程图

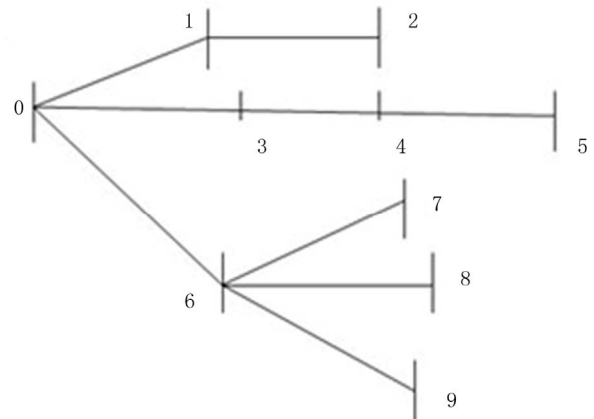


Figure 2. Diagram of 10 bus system
图 2. 10 节点系统网络图

网络中 0 号节点为平衡节点。负荷节点的 1~9 均可安装 DG, 且不大于所安装节点的负荷量, 即 $P_{DGi} \leq P_{Loadi}$ 。DG 直接安装于负荷节点上, 待选单台 DG 的功率因数 $\lambda = 0.92$ 。规定所有 DG 在电网的最大接入容量不超过负荷总量的 40%。系统各节点的电压允许偏差为 0.95~1.05 pu(电压标么值)。线路上流过电流的最大允许上限值为 0.3 KA。

本文设置四种方案分别进行配电网中分布式电源的选址定容的单目标优化研究, 四次试验依次为:

试验 1: 系统网损最小; 试验 2: 系统节点电压偏差最小; 试验 3: 系统静态电压稳定裕度最大。采用带惯性权重的粒子群优化算法对分布式电源进行单目标优化, 各优化结果如表 1 所示。

设置试验 4: 综合考虑系统网损、静态电压稳定裕度和节点电压偏差的多目标优化配置。在多目标模糊优化配置模型中, 把未优化时各子目标初始值作为隶属度函数的容许极限值, 把各子目标单独优化时的最优值作为隶属度函数的期望值, 用于多目标模糊优化。多目标模糊优化结果如表 2 所示。

单目标和多目标模糊优化时各目标的隶属度对比结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 当进行单目标优化配置时(试验 1、2、3), 每次优化都能使得优化子目标的隶属度达到 1, 但是其余两个指标的隶属度相对较低, 系统整体的满意度不是很好。当进行多目标模糊优化配置(试验 4)时, 各优化子目标的隶属度均在 0.97 以上, 虽然各个子目标并非最优, 但由于很好地协调了各子目标之间的关系, 各子目标均具有相对较高的隶属度, 总体满意度比较高, 达到了整体优化的效果。

在进行多目标模糊优化规划之后, 可以得出在 1、2、5、8、9 节点安装相应容量的 DG 可以有效降低系统网损, 有效改善系统节点电压偏差, 提高系统静态电压稳定裕度, 整体优化效果较好。接下来具体要在哪些位置安装何种类型的 DG, 应根据具体情况而定。本文以年发电成本^[16]进行 DG 具体安装类型的优选。假定该系统计划安装 1 台风机, 1 个光伏发电系统, 1 个燃料电池, 其余节点均安装微型燃气轮机。首先依据风力发电和光伏发电系统对安装位置及环境的要求, 确定风机和光伏发电的安装位置。本文假定将风力发电限制在节点 1, 光伏发电限制在节点 5, 则整体规划结果如表 4 所示。容量系数按实际出力与安装容量的比值计算, 为满足发电机的备用容量及配电网负荷增长等要求, 各节点实际配置微电源功率按容量系数计算容量向上取整安装。这里依据可再生新能源项目的推荐值^[17], 风力发电取 0.43, 光伏发电系统取 0.33, 其余取 1。

本算例在建立了 DG 优化规划模型的基础上, 采用多目标模糊优化理论求解了 DG 的最优安装位置和容量, 很好地协调了各子目标的关系。之后, 根据实际配电网的要求, 以年发电成本为目标, 在限制了

Table 1. Results of single-objective optimization planning
表 1. 单目标优化规划结果

试验	规划结果	网损 (MW)	节点电压偏差	静态电压稳定指标
优化前	-	0.1915	0.8581	0.1517
试验 1	1(0.0074)2(1.4188) 5(0.4189)8(0.6652)9(0.4896)	0.0538	0.2283	0.0590
试验 2	2(1.3824)5(0.5000) 8(0.3176)9(0.8000)	0.0564	0.2215	0.0598
试验 3	1(0.1652)2(1.5000)4(0.2173) 6(0.0043)8(0.3246)9(0.7886)	0.0627	0.2704	0.0522

注: 规划结果中括号前的数字为 DG 接入节点编号, 括号中的数字为 DG 安装容量, 如 2(1.5000)表示在第 2 节点接入有功功率为 1.5000MW 的 DG, 功率因数为 $\lambda = 0.92$ 。

Table 2. Results of multi-objective optimization fuzzy planning
表 2. 多目标模糊优化规划结果

试验	规划结果	网损 (MW)	节点电压偏差	静态电压稳定指标
试验 4	1(0.0844)2(1.5000)5(0.2992) 8(0.3907)9(0.7257)	0.0567	0.2354	0.0543

Table 3. Comparison between single and multi-objective optimization results
表 3. 单目标与多目标优化结果比较

试验	$\mu_1(P_{loss})$	$\mu_2(\Delta U)$	$\mu_3(L)$	S
试验 1	1	0.9896	0.9355	0.9355
试验 2	0.9809	1	0.9236	0.9236
试验 3	0.9351	0.9233	1	0.9233
试验 4	0.9783	0.9783	0.9783	0.9783

Table 4. Siting and sizing of DGs optimization planning (unit: KW)
表 4. 分布式电源选址定容优化配置方案(单位: KW)

节点编号	DG 类型	优化功率	计算容量	配置容量
1	风机	84.3709	196.2114	200
2	燃料电池	1500	1500	1500
5	光伏	299.2308	906.76	910
8	微燃机	390.6736	390.6736	400
9	微燃机	725.7247	725.7247	730

WT 和 PV 的安装位置后, 通过经济性指标优化了 MT 和 FC 和安装位置, 达到了经济性方面优化配置的效果。

5. 结论

配电网规划中分布式电源的选址定容问题是一

个涉及到经济性、可靠性等指标的多目标大规模组合优化问题，多数优化问题都基于单目标模型进行求解。本文将重点聚焦在配电网的电能质量方面，建立了配电网网损最小、电压偏差最小、静态电压稳定裕度最大的多目标 DG 规划模型，并基于模糊集理论的多目标单一化求解方法，很好地协调了各目标之间的关系，能够达到整体优化的效果。最后依据环境要求及年发电成本指导了不同类型 DG 的经济配置。采用带惯性权重的粒子群算法进行求解，能克服基本粒子群算法容易陷入局部最优解的缺点。通过某 10 节点算例的仿真分析，验证了模型和算法的正确性和有效性。

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*, **38**, 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*, **28**, 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*, **30**, 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*, **28**, 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, 1-6.
- [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*, **39**, 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*, **31**, 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. *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, Volume 1, Shenzhen, 19-20 December 2009, 145-149.
- [9] 刘述奎, 李奇, 陈维荣, 林川, 郑永康 (2009) 改进粒子群优化算法在电力系统多目标无功优化中应用. *电力自动化设备*, **29**, 31-36.
- [10] 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.
- [11] 张国立, 李庚银, 谢宏, 等 (2004) 多目标加权模糊非线性规划. *华北电力大学学报*, **1**, 37-40.
- [12] 吴晓莉, 林哲辉 (2002) Matlab 辅助模糊系统设计. 西安电子科技大学出版社, 西安, 14-20.
- [13] 胡超芳 (2007) 基于决策者满意度的多目标模糊优化算法研究. 上海交通大学, 上海.
- [14] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995) Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, **4**, 1942-1948.
- [15] 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.
- [16] 刘文胜 (2012) 基于粒子群算法的微电网优化配置与低碳调度. 硕士学位论文, 广东工业大学, 广州.
- [17] Jarrett, K., Hedgecock, J., Gregory R. and Warham, T. (2004) Technical guide to the connection of generation to the distribution network. DTI New & Renewable Energy Programm K/EL/00318/REP/URN 03/1631.