

DOI: 10.7667/PSPC161452

## 计及不确定性因素的配电网网架规划方法

颜炯<sup>1</sup>, 万涛<sup>2</sup>, 李浩松<sup>2</sup>, 杨明<sup>1</sup>, 郑旭<sup>1</sup>, 瞿少成<sup>3</sup>, 李金<sup>2</sup>, 康泰峰<sup>2</sup>

(1. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 北京国网信通埃森哲信息技术有限公司, 北京 100000; 3. 华中师范大学, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 为了在配电网网络架构规划中计及分布式电源出力与负荷不确定性的影响, 提出了模糊规划法。通过三角模糊数表述分布式电源(Distributed Generation, DG)出力的不确定性, 并利用可信度理论构建配电网网架规划模型; 提出了一种快速生成树算法形成待规划系统的初始网络架构, 再利用遗传算法对初始网架进行调整寻优, 最终得到系统最优网架。通过算例仿真验证了该方法的有效性。

**关键词:** 配电网; 网架规划; 分布式电源; 不确定性; 模糊数

### Distribution network planning considering the uncertainties

YAN Jiong<sup>1</sup>, WAN Tao<sup>2</sup>, LI Haosong<sup>2</sup>, YANG Ming<sup>1</sup>, ZHENG Xu<sup>1</sup>, QU Shaocheng<sup>3</sup>, LI Jin<sup>2</sup>, KANG Taifeng<sup>2</sup>

(1. State Grid HBEPC Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430077, China;  
2. State Grid Information & Telecommunication Accenture Information Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China;  
3. Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In order to consider the impacts of distributed generation (DG) output and load uncertainty in distribution network planning, a fuzzy programming approach is proposed. Triangular fuzzy numbers are used to describe the uncertainty of DG. Based on credibility theory, the network planning model of distribution network is established. Moreover, a rapid spanning tree algorithm is presented to form the initial network configuration of under-planning system. Genetic algorithm (GA) is then used to adjust and optimize the initial network configuration and finally get the optimal one. The effectiveness of the proposed approach is proved through case simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61074046 and No. F030107) and Science and Technology Project of Hubei Electric Power Company (No. 52153814000D).

**Key words:** distribution system; network planning; distributed generation (DG); uncertainty; fuzzy

## 0 引言

配电网直接连接用户, 是电网与用户间的桥梁。配电网的供电可靠性直接关乎国民经济与社会民生。发展智能配电网技术有利于促进清洁和可再生能源的发展, 提高供电服务质量<sup>[1-3]</sup>, 是化解能源与环境危机和调整能源结构的必然选择。分布式电源(Distributed Generation, DG)的接入对配电网的正常运行产生了重要的影响, 增加了配电网规划的难度及不确定性, 给配电网的运行以及规划带来了挑战<sup>[4]</sup>。

合理的电网规划不仅可以给电网发展提供正确的方向, 而且有利于减少未来一段时间电网改造的固定投资费用<sup>[5]</sup>。含 DG 的配电网网架规划为多目标多约束的组合优化难题<sup>[6]</sup>, 在规划中需考虑多种不确定因素, 使配电网网架规划建模满足实际要求。

处理配电网规划中不确定性因素的方法包括模糊分析法、随机理论、区间数优化算法以及场景分析法等<sup>[7-9]</sup>。利用概率论处理不确定信息时, 计算量相对较大。场景分析方法虽能有效地处理不确定性的影响, 但是场景划分的数目以及场景的概率难以确定。

模糊数学以其强大的处理不确定信息的能力, 受到了不少学者的重视, 取得了许多实质性的研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074046, F030107);  
国网湖北省电力公司科技项目(52153814000D)

成果, 涌现出大量解决实际问题的方法, 且在电力系统领域获得了广泛应用。在潮流计算方面, 利用模糊集合描述负荷及 DG 的不确定性, 提出了一系列模糊潮流计算方法。文献[10]利用三角模糊数描述节点注入功率不确定性, 利用传统计算潮流的方法得到模糊潮流结果。文献[11]将模糊现象的可信性理论引入潮流计算中, 建立模糊潮流算法。文献[12]根据风电场功率的可能性分布, 采用潮流灵敏度的方法来求解系统模糊交流潮流。在配电网规划方面, 也提出了许多处理模糊信息的规划方法。文献[13]利用模糊集合论中的模糊数描述和处理电网规划中的模糊性因素, 建立以模糊供电总成本最小为优化目标的电网规划模型。文献[14]在配电网规划中通过构建梯形隶属度函数对风力发电的容量因子进行模糊建模。文献[15]在机组组合优化问题中, 构建了光伏发电出力的三角隶属度函数模型, 该模型描述的是光伏出力最大的可能性。文献[16]考虑了负荷预测值和部分类型的 DG 输出功率的不确定性, 构建模糊期望值模型。

本文通过计及 DG 不确定性的影响, 利用三角模糊数对 DG 出力进行建模。基于可信性理论构建配电网网架模糊规划模型, 提出了配电网网架模糊规划方法。

## 1 网架规划的模糊期望优化模型

作为随机概率分析的有效补充, 模糊分析理论自上世纪 70 年代 Zadeh 提出以来, 已经在风力与光伏发电领域得到了一定应用。基于模糊理论的风电不确定性建模分析的核心是构建合理的风电出力或风速隶属度函数。文献[14]建立了梯形隶属度函数, 其表述了风电出力取值范围的可能性, 风电越偏离该范围, 隶属程度随偏离程度越小。文献[15]通过构建三角隶属度函数模拟光伏发电出力的不确定性, 体现出光伏出力取值的概率大小。文献[17]构建了风速预测误差的类三角形隶属度函数, 根据风电有功出力-风速之间的关系构建风电出力的模糊模型。

### 1.1 模糊期望值计算

设  $\xi$  是正规模糊变量, 关于模糊变量  $\xi$  的期望值定义为

$$E[\xi] = \int_0^{\infty} Cr\{\xi \geq r\} dr - \int_{-\infty}^0 Cr\{\xi \leq r\} dr \quad (1)$$

当  $\xi$  是正规连续模糊变量时, 可采用模糊期望值定义式直接求取。正三角模糊数  $\xi, \xi = \langle a_1, a_2, a_3 \rangle$ ,  $a_1 \geq 0$ , 其模糊期望值计算如下<sup>[18]</sup>:

$$\begin{aligned} E(\xi) &= \int_0^{\infty} Cr\{\xi \geq r\} dr - \int_{-\infty}^0 Cr\{\xi \leq r\} dr = \\ &= \int_0^a Cr\{\xi \geq r\} dr + \int_a^b Cr\{\xi \geq r\} dr + \int_b^c Cr\{\xi \geq r\} dr = \\ &= \int_0^{a_1} \frac{1}{2} dr + \int_{a_1}^{a_2} \frac{1}{2} \left(2 - \frac{r-a_1}{a_2-a_1}\right) dr + \int_{a_2}^{a_3} \frac{1}{2} \cdot \frac{a_3-r}{a_3-a_2} dr = \\ &= \frac{1}{4} a_1 + \frac{1}{2} a_2 + \frac{1}{4} a_3 \end{aligned} \quad (2)$$

### 1.2 模糊期望值建模

以三角模糊数的形式构建 DG 出力与负荷大小的不确定性, 以模糊期望值模型处理网架规划目标函数。

$$\begin{cases} \min E(\gamma \sum_{k \in L} x_k A_k + C_{\text{loss}}(x)) \\ \gamma = \frac{\eta(1+\eta)^n}{(1+\eta)^n - 1} \\ C_{\text{loss}}(x) = \mu \sum_{s=1}^{N_b} \lambda_s P_{\text{loss}}(x) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $E$  为期望值;  $\eta$  为收益率;  $L$  为新建线路集合;  $n$  为规划周期;  $\gamma$  为固定投资年平均费用系数;  $x_k=1$  表示线路投运,  $x_k=0$  表示不投运;  $A_k$  为馈线支路  $k$  的建设费用;  $\mu$  为单位电价;  $N_b$  为规划区内所有支路集合;  $\lambda_s$  为支路  $s$  的年小时数;  $P_{\text{loss}}$  为支路  $s$  的线耗。

约束条件

1) 等式约束 (系统的功率平衡, 潮流存在)

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  分别为节点  $i$  的 DG 有功与无功注入功率;  $V_i$  为节点  $i$  的电压幅值;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  和  $\theta_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  之间的电导、电纳和电压相角差。

2) 安全约束

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (5)$$

$$S_i \leq S_{i\max} \quad (6)$$

$$S_{ii} \leq S_{ii\max} \quad (7)$$

式中:  $V_{\min}$  为允许的最低电压幅值;  $V_{\max}$  为允许的最高电压幅值;  $S_i$  与  $S_{i\max}$  分别为流入支路  $i$  的复功率值以及允许通过的最大值;  $S_{ii}$  与  $S_{ii\max}$  分别为变压器  $i$  的当前复功率值以及最大载容量。

3) 网络拓扑约束。规划前后拓扑保持放射状。

$$g_k \in G \quad (8)$$

式中:  $g_k$  为规划后的网络结构;  $G$  为所有可行的辐射状网络结构的规划集合。

式(5)一式(7)的不等式约束都采用惩罚函数的形式考虑于目标函数中。其适应度函数为  $f(x)$ ，如式(10)所示。

$$f(x) = E(\gamma(\sum_{j \in L_1} x_j A_j + \sum_{j \in L_2} c_j n P_b) + C_{\text{loss}}(x)) + J_{\text{pen}} \quad (9)$$

式中， $J_{\text{pen}}$ 为惩罚函数。

## 2 不确定因素的三角模糊数建模

DG 出力和负荷均采用三角模糊数模型，分别计算 DG 出力及负荷的模糊变量左、右边界和中心值，得到配电网模糊潮流的近似分布，利用模糊数大小比较方法比较潮流及网络损耗的大小。

当负荷及 DG 出力为模糊数时，潮流结果也是一个模糊数，一般情况下为不规则的模糊数。取负荷模糊数的左边界值及 DG 出力的右边界值进行基本潮流计算，得到线路潮流模糊数的左边界值及网络损耗模糊数的左边界值；取负荷模糊数及 DG 出力模糊数出力的中心值，得到潮流分布模糊数的中心值；取负荷模糊数右边界值及 DG 模糊数左边界值时，得到潮流分布的右边界值。根据模糊潮流结果的左、右边界值及中心值，确定了潮流结果的大致分布。

负荷三角模糊数表述为  $(L_{Li}, L_{Di}, L_{Ri})$ ，DG 出力模糊数表述为  $(G_{Li}, G_{Di}, G_{Ri})$ 。基于边界值模糊潮流算法的具体步骤如下：

1) 根据负荷模糊数的左边界  $L_{Li}$  和 DG 出力的右边界  $G_{Li}$  计算潮流，得到线路潮流的左边界值  $P_{Li}$ 、网损的左边界值  $\Delta P_{Li}$  和节点电压右边界值  $U_{Li}$ 。

2) 取负荷模糊数的中心值  $L_{Di}$  及 DG 出力模糊数的中心值  $G_{Di}$  计算潮流，得到线路潮流的中心值  $P_{Di}$ 、网损的中心值  $\Delta P_{Di}$  和节点电压中心值  $U_{Di}$ 。

3) 取负荷模糊数的右边界  $L_{Ri}$  及 DG 出力模糊数的左边界  $G_{Ri}$  计算潮流，得到线路潮流的右边界值  $P_{Ri}$ 、网损的右边界值  $\Delta P_{Ri}$  和节点电压左边界值  $U_{Ri}$ 。

该算法只对负荷及 DG 模糊值的左、右边界值及中心值进行潮流计算，计算量是参数确定情况下的三倍，计算量相对较小，计算效率较高，且可得到模糊潮流结果的大致分布。不足之处为无法准确获得潮流结果的模糊分布，精度相对较差。实际规划应用中因需要评价规划结果，潮流计算次数的量很大，采用此种计算量较小的方法，在满足工程精度要求的条件下有利于提高计算效率。

## 3 数学模型的求解

含 DG 的配电网网架规划方法实质为配电网网

架结构与 DG 的组合规划。首先，通过模糊数模型描述用户 DG 出力的不确定性，并通过模糊期望值将模糊优化规划问题转化为确定性规划问题。先确定初始网架结构，通过遗传算法调整网架结构；同时利用自适应遗传算法的并行性特点确定 DG 的选址和定容。

### 3.1 初始网架的确定

根据节点的父子关系找寻系统的生成树，其不足之处如下：

- 1) 系统的节点集合为  $V$ ，边集合为  $E$ ；
- 2) 电源点(变电站)的编号合并，得到类似于单变电站系统的拓扑结构，节点编号为 0；
- 3) 定义新的空集合  $V_{\text{new}} = \{\}$  以及边集合  $E_{\text{new}} = \{\}$ ；
- 4) 将首节点(编号为 0)赋初值于父节点集合  $Father\_V$  与  $V_{\text{new}}$  中，定义空集合  $Son\_V = \{\}$ ；
- 5) 遍历父节点集合  $Father\_V$ ，若与父节点相关节点位于集合  $V$  中，但是不存在于集合  $V_{\text{new}}$  中，则将其存在于  $V_{\text{new}}$  与  $Son\_V$ ，对应的边存于  $E_{\text{new}}$ ；
- 6) 判断  $V_{\text{new}}$  是否等于  $V$ ，相等则跳出循环，不相等，则将  $Son\_V$  的值赋予  $Father\_V$ ，并将  $Son\_V = \{\}$ ，重复步骤 5)。

### 3.2 基于遗传算法的求解步骤

在初始网架的基础上调整网架结构及确定 DG 位置和容量，实现目标函数最优。利用遗传算法求解模型，具体步骤如下。

1) 确定 DG 容量上限，进行 DG 建模。对规划区域进行实地考察，确定哪些区域具有建设风电场和太阳能发电场的条件，确定这些区域对应的并网节点。每个节点接入的 DG 容量不超过节点的负荷量，且电网建设的 DG 总容量的最大值受渗透率限制。

2) 根据 3.1 节所示方法形成初始网架结构，确定编码结构。

3) 形成初始种群。设置初始种群的规模  $M$ 。编码的形式如式(10)所示，其中  $x_i$  表示第  $i$  个不包含初始网架的待选支路，用二进制进行编码，0 表示断开，1 表示闭合； $SS_i$  表示第  $i$  个初始网架的初选支路。

$$X = \{x_1, SS_1 \cdots x_n, SS_n \cdots x_n, SS_n\} \quad (10)$$

每个基因位在取值范围内随机产生一个整数，形成新的个体，检验该个体对应的网架结构是否满足约束要求，计算罚函数值与适应度值，最终形成初始种群。

4) 选择、交叉和变异产生新解。设置最大迭代次数  $N_{max}$  和一个较小的正数  $\varepsilon$ 。依据遗传算法的选择、交叉和变异等操作产生新的种群<sup>[19]</sup>。在迭代过程中, 记录每一代种群中的最佳个体, 在进行下一次选择操作时, 该最优个体直接进入下一代种群。当迭代次数达到  $N_{max}$  时, 寻优过程结束, 输出适应度值最高个体对应的方案; 或者当相邻两代种群最优个体适应度值之差的绝对值小于  $\varepsilon$  时, 迭代结束, 得到最佳方案。

### 4 算例分析

规划区域如图 1 所示, 其中数字为负荷点或交叉点的编号,  $S_1$ — $S_4$  为变电站, 实线为原有线路, 虚线为可能的线路走廊。规划参数设置如下。1) 电网相关参数: 单位电费为 0.5 元/kWh, 规划周期为 10 年, 年平均用电 5000 h, 配电网的额定电压为 10 kV, 各个负荷点的功率因数均取 0.85, 假设单位长度线路的施工费用为 1 万元/km; 2) 仿真实验环境: 处理器主频 2.2 GHz, 内存 2 GB, 编译环境为 Matlab2009; 3) 遗传算法参数: 种群规模 30, 交叉率 0.75, 变异率 0.05。系统参数见文献[20], 系统中接入分布式电源的位置与容量如表 1 所示。

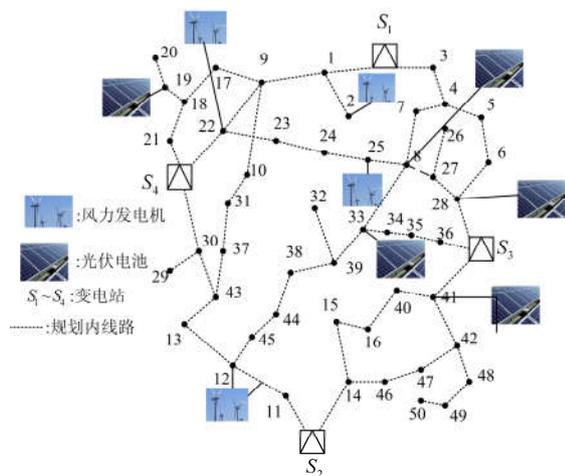


图 1 待规划区域  
Fig. 1 Planning area

首先利用本文所提出的算法得到初始网架结构, 如图 2 所示。实线表示初始网架规划线路, 虚线表示初始网架外线路。基于初始网架, 结合以上设置的参数进行编码, 运用遗传算法对初始网架结构进行调整和优化, 得到最优结果。图 3 所示为考虑分布式电源及负荷出力不确定性的配电网网架规划结果。

表 1 系统分布式电源接入位置与容量

Table 1 Position and capacity of DGs		
安装位置(节点号)	分布电源类型	容量/(kW/p.f.)
2	风力发电机	3000/0.9
12	风力发电机	4000/0.9
22	风力发电机	6000/0.9
25	风力发电机	4000/0.9
8	光伏电池	5000/1
19	光伏电池	5000/1
28	光伏电池	5000/1
33	光伏电池	5000/1
41	光伏电池	5000/1

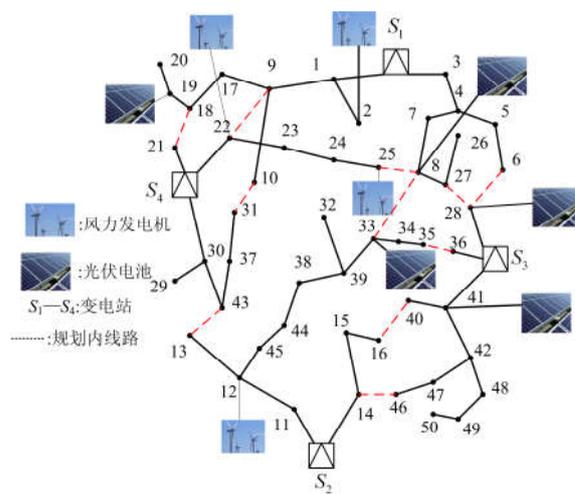


图 2 初始网架结构  
Fig. 2 Initial planning area

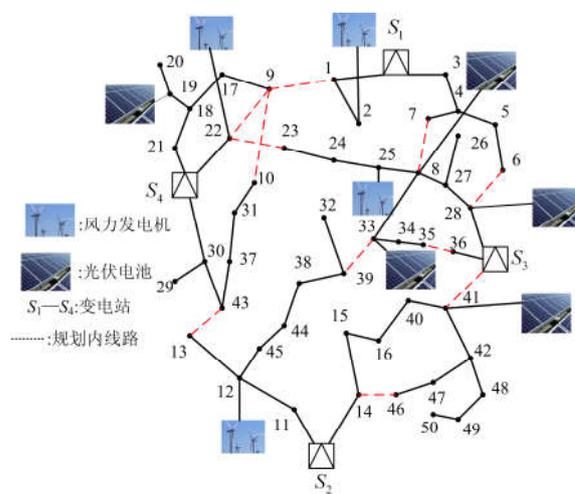


图 3 计及分布式电源及负荷出力不确定性的配电网网架规划结果  
Fig. 3 Results of distribution networks planning considering the uncertainties of DGs

表 2 给出了不同仿真场景下的仿真结果，从中可以看出，考虑分布式电源接入后，优化后的目标函数值更小。这是因为分布式电源的接入改善了系统的潮流分布，减小了系统的网络损耗。图 4 给出

了不同仿真场景下系统优化前后的电压分布情况，显而易见，接入一定量的分布式电源有利于改善系统的节点电压分布。

表 2 不同仿真场景下的仿真结果

Table 2 Simulation results of different simulation scenarios

编号	场景描述	没有被选中的支路	新建线路费用期望值/万元	网损费用期望值/万元
1	初始网架	18-21, 9-22, 10-31, 13-43, 8-25, 8-33, 27-28, 6-28, 35-36, 16-40, 14-46	128.89	0.117
2	接入分布式电源，但是不考虑分布式电源及负荷的波动性	0-1, 9-22, 43-37, 0-30, 8-25, 8-33, 27-28, 6-28, 33-34, 15-16, 42-47	123	0.094
3	接入分布式电源，考虑分布式电源以及负荷的波动性	7-8, 6-28, 14-46, 0-41, 35-36, 33-39, 13-43, 22-23, 9-1, 9-10, 9-22	122.3555	0.1145

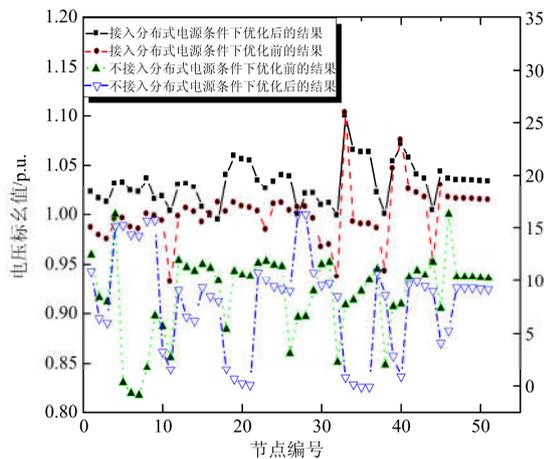


图 4 不同场景下系统优化前后的电压分布

Fig. 4 Nodal voltage profile of the planning distribution networks in different scenarios

### 5 结语

通过仿真分析可知，本文所提出的规划方法能够充分考虑用户侧 DG 出力以及负荷的不确定性，依据模糊期望值建立优化模型，通过选优能够使决策者实现更加科学的决策。提出的模糊规划方法采用年平均费用模糊期望值作为目标函数，具有较好的实用性。潮流计算方面，每个解只需进行 3 次潮流计算，具有较高的效率，适合应用于较大区域的规划研究。

### 参考文献

[1] 张彼德, 何頔, 张强, 等. 含分布式电源的配电网双层扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 80-85. ZHANG Bide, HE Di, ZHANG Qiang, et al. Double distribution network expansion planning including distributed power[J]. Power System Protection and Control,

2016, 44(2): 80-85.  
 [2] 宋旭东, 张晓平, 余南华, 等. 考虑分布式能源接入的配电网规划及其关键技术综述[J]. 陕西电力, 2015, 43(3): 38-42. SONG Xudong, ZHANG Xiaoping, YU Nanhua, et al. A review of distribution network plan considering the access of dg and its key technology[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(3): 38-42.  
 [3] 赵文会, 余金龙, 李士动. 基于 SMCS-NSGA II 的独立型微网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 44(1): 97-105. ZHAO Wenhui, YU Jinlong, LI Shidong. Optimal configuration of standalone microgrid based on SMCS-NSGA II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 44(1): 97-105.  
 [4] ALAVI S, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal probabilistic energy management in a typical micro-grid based on robust optimization and point estimate method[J]. Energy Conversion Management, 2015, 95(8): 314-325.  
 [5] 涂福荣, 王晓茹. 电力系统无功优化模糊建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 46-49. TU Furong, WANG Xiaoru. Fuzzy modeling for power system reactive power optimization[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 46-49.  
 [6] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 124-133. LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 124-133.  
 [7] 张小龙, 周玲, 朱桃靓, 等. 基于粗糙集理论的分布式

- 电源与配电网架多目标协调规划[J]. 陕西电力, 2016, 44(5): 9-13.
- ZHANG Xiaolong, ZHOU Ling, ZHU Guangliang, et al. multi-objective coordinated planning of DG and incorporating distribution network based on rough set theory[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(5): 9-13.
- [8] 张永伍, 余贻鑫, 严雪飞, 等. 基于区间算法和范例学习的配电网网架规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 40-44.
- ZHANG Yongwu, YU Yixin, YAN Xuefei, et al. Distribution network planning based on interval algorithm and paradigm learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 40-44.
- [9] 李振伟, 马明禹, 杨娜, 等. 配电网多阶段多场景规划方式研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 49-53.
- LI Zhenwei, MA Mingyu, YANG Na, et al. Study on distribution network multi-scenario planning mode[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 49-53.
- [10] 张焰, 陈章潮. 电网规划中的模糊潮流计算[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(3): 20-22.
- ZHANG Yan, CHEN Zhangchao. The calculation of fuzzy load flow in electric power planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(3): 20-22.
- [11] 汪皓, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的模糊潮流方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 21-25.
- WANG Hao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Fuzzy power flow based on credibility theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 21-25.
- [12] 洪芦诚, 石立宝, 姚良忠, 等. 计及风电场发电功率不确定性的电力系统模糊潮流[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 116-122.
- HONG Lucheng, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Fuzzy modelling and solution of load flow incorporating uncertainties of wind farm generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 116-122.
- [13] 张焰, 陈章潮, 谈伟. 不确定性的电网规划方法研究[J]. 电网技术, 1999, 23(3): 16-19, 23.
- ZHANG Yan, CHEN Zhangchao, TAN Wei. An approach for transmission system planning incorporating uncertainties[J]. Power System Technology, 1999, 23(3): 16-19, 23.
- [14] ZANGENEH A, JADID S. Fuzzy multiobjective model for distributed generation expansion planning in uncertain environment[J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21(1): 129-141.
- [15] URBINA M, LI Z. A fuzzy optimization approach to PV/battery scheduling with uncertainty in PV generation[C] // Proc of the 38th North American Power Symposium, Carbondale, 2006: 561-566.
- [16] 杨毅, 韦钢, 周冰, 等. 含分布式电源的配电网模糊优化规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 19-23.
- YANG Yi, WEI Gang, ZHOU Bing, et al. Optimized fuzzy planning of the distribution network including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 19-23.
- [17] LIANG R, LIAO J. A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1665-1674.
- [18] LIU Baoding. Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models[J]. IEEE Transactions on Fuzzy System, 2002, 10(4): 445-450.
- [19] 刘晓飞, 彭建春, 高效, 等. 基于单亲遗传算法的配电网规划[J]. 电网技术, 2002, 24(3): 52-56.
- LIU Xiaofei, PENG Jianchun, GAO Xiao, et al. Distribution network planning based on partheno-genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2002, 24(3): 52-56.
- [20] MIRANDA V, RANITO J V, PROENCA L M. Genetic algorithms in optimal multistage Distribution network planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(4): 895-900.

收稿日期: 2016-09-05; 修回日期: 2016-11-30

作者简介:

颜 炯(1971—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划和电力系统建模与仿真。E-mail: 361605883@qq.com

(编辑 葛艳娜)