

主动配电网的分布式电源优化规划方案研究

张跃¹, 杨汾艳¹, 曾杰¹, 张斌², 梁唐杰²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 佛山电力设计院有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 主动配电网(ADN)模式是一种可以优化利用分布式能源资源的技术解决方案。在评估主动配电网的分布式电源接入方案时, 计及分布式电源的发电效益成本以及其对电网运行影响的基础上, 考虑分布式电源的减排指标, 构建主动配电网低碳优化目标函数模型。在各指标权重赋值时, 为避免造成人为主观性过强, 根据1-9标度法, 通过一致性校验形成判断矩阵, 得到合理的权重系数。其次, 为体现各指标变化趋势并具有一定区分度, 采用隶属度函数对各指标值进行隶属化, 将各自的效益值隶属化后与对应的权重加权。最后, 基于遗传算法对IEEE14节点算例开展方案分析, 得出分布式电源的优化规划方案, 结果表明所提出的低碳优化模型合理有效。

关键词: 主动配电网; 分布式电源; 低碳优化目标函数; 权重因子; 优化规划方案

Research of distributed generation optimization planning for active distributed network

ZHANG Yue¹, YANG Fenyan¹, ZENG Jie¹, ZHANG Bin², LIANG Tangjie²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Grid Company Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. Foshan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: Active distribution network (ADN) mode is a technology to optimize the usage of distributed energy resources. Considering the generation benefit cost of distributed generation and its impact on the power grid when assessing the injected solutions of distributed generation into the active distribution network, and considering the reduction of emission targets of the distributed generation, this paper builds a low-carbon optimization objective function model. To avoid human subjectivity too strong when assigning the index weight, according to the 1-9 scale theory, it forms a judgment matrix through the consistency check and gets the reasonable weighting factor. Secondly, to reflect the trends of each indicator and have a certain degree of distinction, it uses membership function for each index value membership, and weights the effectiveness of each membership value corresponding to the weight. Finally, the optimization studies of IEEE14 system is carried out based on GA algorithm, the results show that the proposed low-carbon optimization model is reasonable and effective.

Key words: active distribution network (AND); distributed generation; a low-carbon optimization objective function; weights factors; optimization planning

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)15-0067-06

0 引言

主动配电网(ADN)模式是一种可以优化利用分布式能源资源的技术解决方案。主动配电网规划是一个涉及多目标及众多不确定因素的组合优化复杂问题, 如多种资源(上级网络和分布式能源)的综合利用、多种负荷类型(电、热和冷)的相互协调、多种网络(电力网络、通信网络)的协调运行, 以及不同利益相关者(配电企业, 发电商, 消费者、生产性消费者)的协同共赢问题等^[1]。

文献[1]深入剖析了主动配电网规划所需处理的相关问题, 综述了主动配电网规划的现有研究成果, 从计算平台、优化算法、评估流程、成本效益评估、信息需求和技术准则的调整等方面深入介绍了针对 ADN 的全方位研究。文献[2-3]分别提出了 ADN 静态及动态规划模型, 通过构建预想场景集, 对线路容量、联络开关及 DG 配置进行综合优化, 实现了系统投资运行总成本最小。针对传统配电网向 ADN 过渡的问题, 文献[4]以投资经济性及分布式电源运行效率最优作为目标函数, 同时考虑功率

平衡、开关配置、分布式电源运行、负荷增长等约束条件,提出了一种多目标规划模型。文献[5]进一步计及实际运行中 DG 停运的可能,提出了一种基于多构型多时段最优潮流的 ADN 规划方法,并分析了 DG 可用性对电网运行效益的影响。文献[6]着重分析了 ADN 及其低碳潜力分析,指出在 ADN 下,通过先进的信息控制及自动化技术,可以对区域内供应侧与需求侧资源实施主动管理,以实现系统特定运行目标(如网损、资产利用效率或绿色能源消纳等)的最优。文献[7]研究主动配电网对分布式能源的消纳模式、潮流流向、储能配置及经济优化函数,并针对消纳模式的优缺点提出了相应的应用场景。

目前国内针对主动配电网中分布式电源接入方案的优化规划问题还有待深入开展,可见文献多针对传统配电网中接入分布式电源的选址定容问题。文献[8]在目标函数中计及了 DG 投资、发电成本、短路电流等因素;文献[9]考虑 DG 环境效益的量化指标,建立了考虑环保效益的电量成本计算模型;文献[10-11]主要针对分布式电源接入配电网前后对网络损耗的影响;文献[12]主要考虑的是投资和网损费用;文献[13]的目标函数虽然考虑了经济性、可靠性和环境效益,但未考虑各指标的重要程度和在综合目标函数中的协调性;文献[14]考虑风电的随机波动性、电动汽车充电需求、分时电价等,建立了基于机会约束规划的优化配置模型;文献[15]建立了以分布式电源售电费用与运行维护费用之差最大为目标的规划模型;文献[16]建立了风速多场景概率分布条件下的风电机组出力模型,考虑有功损耗和静态电压稳定性。以上文献分别基于不同的考核指标,建立不同的目标函数评估分布式电源接入的优化规划方案,对于主动配电网的分布式电源优化规划有一定的借鉴意义。本文在主动配电网的分布式电源接入方案评估时,计及分布式电源的发电效益成本以及其对电网运行影响的基础上,考虑分布式电源的减排指标,构建主动配电网低碳优化的目标函数模型,基于年节约费用、电压偏差、系统平均供电可靠性和 CO₂、有毒气体的排放量等指标变量,在各指标权重赋值时,为避免造成人为主观性过强,引入 1-9 标度理论,通过一致性校验形成判断矩阵,得到合理的权重系数。其次,为体现各指标变化趋势并具有一定区分度,采用隶属度函数对各指标值进行隶属化,将各自的效益值隶属化后与对应的权重加权。最后,基于遗传算法针对 IEEE14 节点算例开展优化方案研究,得出分布式电源的优化规划方案,结果表明所提出的低碳优化目标函数合理有效。

1 主动配电网的低碳优化目标函数

针对主动配电网的低碳优化和兼容分布式电源的特点,选取年节约费用、最大节点电压偏差、系统平均可靠性、二氧化碳和有毒气体减少量等 5 个指标,采用 1-9 标度理论确定各指标权重系数,为符合各指标变化趋势并具有一定区分度,建立各指标对应的隶属度函数,将各指标计算值隶属化后与对应的权重加权,最后得到主动配电网的低碳优化目标函数。

1.1 各指标选取说明

(1) 年节约费用

主动配电网首先应考虑主动配电网中间歇式能源的经济性。本文选取风力发电的电源模型经济性进行计算。风力发电机的年成本计算公式为

$$C_{WT} = r \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \cdot A_{WT} + L_{WT} + W_{WT} \quad (1)$$

式中: A_{WT} 为风力发电机的造价; r 为等年值利率; n 为风力发电机的使用年限; L_{WT} 为风力发电机的年综合投资费,包括风力发电机设备投资、建设场地费和配套设施投资等; W_{WT} 为风力发电机的年运行维护费用。

所提出的表示主动配电网经济性的年节约费用是指加入分布式电源后,降低的网损费用加上分布式电源自身的发电收益再减去风力发电机的年成本。其公式为

$$C_{\text{年节约}} = \Delta P_{\text{loss}} \cdot t \cdot k - P_{\text{DG}} \cdot t \cdot k - C_{WT} \quad (2)$$

式中: ΔP_{loss} 为初始系统的网损和加入 DG 后系统网损的差值; t 为风力发电机的年利用小时数; k 为电价。

(2) 电压偏差

分布式电源接入主动配电网后,有利于提高线路末端电压,分布式电源提高电压质量的计算式为

$$U = |\Delta U_{\text{max}} - \Delta U_{\text{maxDG}i}| \quad (3)$$

式中: ΔU_{max} 为未加入 DG 系统的节点最大电压偏差; $\Delta U_{\text{maxDG}i}$ 为加入 DG 后,系统的节点最大电压偏差。

(3) 平均供电可靠性

分布式电源备用电源可以提高用户的供电可靠性。其可靠性模型为

$$ASAI = \frac{\sum N \times 8760 - \sum t_s N_i}{\sum N \times 8760} \quad (4)$$

式中: N 表示系统总用户数; N_i 表示故障时受影响

的用户数; t_s 表示每个用户平均停电时间。

(4) 减排指标

主动配电网的低碳效益主要体现在减少火力发电量, 从而减少 CO_2 和有毒气体的排放量。传统的发电机组(比如燃煤发电)对环境危害比较严重, 在发电过程中向空气中排放 SO_2 、 CO_2 、氮氧化物等污染物。火力发电时, 产生 $1 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 需要 0.334 吨煤, 燃烧一吨煤产生 $2\ 620 \text{ kg CO}_2$ 和 15.9 kg 有毒气体(NO_x 、 SO_2)^[8]。

本文所提出的主动配电网带来的减排是指加入 DG 后, 负荷点所需有功部分可由 DG 供给, 从而减少了火力发电量, 进而减少了烧煤量, 其计算公式如下。

减少的 CO_2 排放量为

$$E_{\text{co}_2\text{排放量}} = \Delta P_{\text{loss}} \cdot t \cdot 0.334 \cdot 2620 \cdot \eta \quad (5)$$

减少的有毒气体排放量为

$$E_{\text{有毒气体排放量}} = \Delta P_{\text{loss}} \cdot t \cdot 0.334 \cdot 15.9 \cdot \eta \quad (6)$$

式中: ΔP_{loss} 为初始系统的网损和加入 DG 后系统网损的差值; t 为 DG 的年利用小时数; η 为分布式电源的年利用率系数。

1.2 1-9 标度法的权重因子确定

1.2.1 基于 1-9 标度法的权重计算步骤

在考虑多因素的综合目标函数建立的过程中, 各因素的权重选取十分重要, 为避免造成人为主观性过强, 引入 1-9 标度法开展各指标的权重赋值。具体步骤如下:

(1) 根据 1-9 标度法理论, 将指标进行两两比较, 得到量化的判断矩阵。标度是语义的量化, 主要用于表达因素的相对重要性, 而不是数学上的倍数关系。表 1 为 1-9 标度表。

表 1 1-9 标度表

Table 1 1-9 scale table

标度 a_i	语言描述的程度
1	同等重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	强烈重要
9	极端重要
2, 4, 6, 8	相邻标度中值

结合主动配电网的特点和以往电网建设的经验, 现设定最大节点电压偏差、年节约费用、系统平均可靠性、 CO_2 减少量、有毒气体减少量这 5 个效益指标的重要程度依次为 5、9、4、3、2, 构造判断矩阵。矩阵对角元素 a_{ii} 表示自身的重要性比

较, 即判断矩阵对角线均为 1。 a_{ij} 表示第 i 个指标与第 j 个指标的重要程度的比较数值, 即 $a_{ij} = a_i / a_j$, 例如, a_{12} 表示最大节点电压偏差与年节约费用的重要程度数值相比, 即 $5/9=0.556$ 。其余元素以此类推。本文选取了 5 个指标, 得到 5 阶判断矩阵。

(2) 计算权重向量: 计算判断矩阵的最大特征值和特征向量;

(3) 一致性检验: 为了验证这 5 个指标重要程度的设定能否使得主动配电网的分布式电源规划结果符合实际情况, 同时避免人为主观性过强, 就要对判断矩阵作一致性检验, 检验方法如下:

① 计算判断矩阵最大特征根 λ_{max} ;

② 计算一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1} \quad (7)$$

CI 的值越小越趋近于 0, 说明 λ_{max} 越接近 n , 所以理想状态下, CI 的值为零。随着判断矩阵的维数增大, 判断矩阵的一致性将越差。由于本文共选取了 5 个效益指标, 为 5 阶判断矩阵, 故采用随机一致性指标(CR)衡量判断矩阵的一致性程度。

③ 根据矩阵的阶数 n , 从表 2 查到相应的平均随机一致性指标 RI。

表 2 RI 参数表

Table 2 RI parameters table

n	1	2	3	4	5
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12

④ 计算随机一致性指标 CR

$$CR = CI / RI \quad (8)$$

CR 值越小, 一致性越满足。一般当 CR 小于 0.1 时, 则认为判断矩阵满足一致性要求。

1.2.2 各指标的权重计算

综合考虑年节约费用、最大节点电压偏差、系统平均可靠性、二氧化碳和有毒气体减少量等 5 个指标在方案中的重要性和出现问题的可能性, 依据专家经验各个指标的相对一级指标判断矩阵 J 为

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0.556 & 1.25 & 1.667 & 2.5 \\ 1.8 & 1 & 2.25 & 3 & 4.5 \\ 0.8 & 0.444 & 1 & 1.333 & 2 \\ 0.6 & 0.333 & 0.75 & 1 & 1.5 \\ 0.4 & 0.222 & 0.5 & 0.667 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

利用 Matlab 求解式(9)得 $\lambda_{\text{max}} = 4.999\ 6$, 根据公式 $CI = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1}$, 计算一致性指标 CI 为

$$CI = \frac{4.9996 - 5}{4} = -0.00001 \quad (10)$$

根据 RI 参数表, 查得 $n=5$ 时, $RI=1.12$,

$$CR = CI / RI = -0.00001 / 1.12 = -8.92 \times 10^{-5} \quad (11)$$

由式(11)可知 $CR \ll 0.1$, 一致性校验通过。

求解 λ_{\max} 对应的特征向量为

$$V = [0.4304, 0.7746, 0.3442, 0.2581, 0.1721]$$

对其进行归一化处理, 可以求出指标的权重为

$$W = [0.217, 0.391, 0.174, 0.130, 0.0869]$$

表 3 各指标量化权重因子

Table 3 Weighting factor of each index	
降低节点最大电压偏移	0.217
节省年综合费用	0.391
系统可靠性	0.174
减少 CO ₂ 排放量	0.130
减少有毒气体排放量	0.0869

1.3 低碳优化目标函数构建

根据每个指标的计算值和变化规律, 选取 5 个不同的隶属度函数与各指标相对应。

(1) 年节约费用的隶属度函数

由 1.1 节可知, 本文所提出的年节约费用是指加入分布式电源后, 降低的网损费用加上分布式电源自身的发电收益再减去风力发电机的年成本。为符合年节约费用的变化趋势, 同时使年节约费用与隶属化后的评分值满足线性关系, 并在 [0, 1] 范围具有一定区分度, 故年节约费用的隶属度函数取为

$$\mu = \begin{cases} \frac{1}{C_{\max}} C & 0 \leq C \leq C_{\max} \\ 0 & C \geq C_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: C 为年节约费用; C_{\max} 为年节约费用最大值, 根据年节约费用的计算值, 取 $C_{\max}=500$ 万元较为符合年节约费用的变化趋势。

(2) 电压偏差的隶属度函数

在电压较小时, 电压偏移量变化很小, 当电压增大时, 偏移量有较为明显的下降, 之后又趋于平稳, 与下降型指数函数的曲线相吻合, 故电压偏差的隶属度函数为

$$\mu = \begin{cases} \frac{1}{e^{k\Delta U}} & 0 \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max} \\ 0 & \Delta U \geq \Delta U_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ΔU_{\max} 为系统允许的最大电压偏差, 本文取 $\Delta U_{\max}=3\%$; k 为一正实数, 经调试, 当 $k=15$ 时曲

线较符合电压质量的变化趋势。

(3) 平均供电可靠性的隶属度函数

可靠性本身就很高的情况下符合正弦函数 $[0, \pi/2]$ 段的曲线规律, 故平均供电可靠性的隶属度函数为

$$\mu = \begin{cases} \sin \left[\frac{\pi}{2(100 - x_0)} (x - x_0) \right] & x_0 \leq x \leq 100 \\ 0 & x \leq x_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: x 为系统平均供电可靠率; x_0 为系统平均供电可靠率参考值, 根据可靠性的计算值, x_0 取 99.99 较为符合可靠性的变化规律。

(4) 减排指标的隶属度函数

二氧化碳和有毒气体的排放量主要与 DG 接入容量有关, 接入容量越大, 所需火力机组发出的功率越小, 二氧化碳和有毒气体的排放量就会相应减小, 符合下降型指数函数变化规律, 故减排指标的隶属度函数为

$$\mu = \begin{cases} e^{-k(n_{\max} - n)} & 0 \leq n \leq n_{\max} \\ 0 & n \geq n_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: n 为 CO₂ 和有毒气体的排放量; n_{\max} 为 CO₂ 和有毒气体的最大排放量, 根据 CO₂ 和有毒气体的排放量的计算值, 当计算 CO₂ 时, 取 $k=0.00008$, $n_{\max}=10000$; 计算有毒气体时, 取 $k=0.008$, $n_{\max}=50$ 时能有效区分各方案优劣且满足变化趋势。

(5) 低碳优化目标函数构建

低碳优化目标函数是考虑权重因子后将对应的各项指标求和, 其表达式为: $P = \sum_{i=1}^5 \omega_i \mu_i$, 其中 ω_i 为各指标的权重, μ_i 为各指标隶属度函数值。

2 分布式电源的优化规划方案研究

基于上述低碳优化目标函数, 针对算例配电网采用遗传算法对其进行寻优计算。首先输入电网原始数据, 并设置遗传算法参数: 种群大小 $NIND=40$; 最大遗传代数 $MAXGEN=100$; 采用二进制编码, 个体长度 $PRECI=20$; 交叉概率 $P_c=0.7$; 变异概率 $P_m=0.01$ 。其次设定在计算各指标值时所需参数: 双馈风力机的使用寿命 $n=20$ 年; 电价 $k=0.55$ 元/kW·h; 等年值利率 r 取 5%; 1.5 MW 和 2 MW 双馈风力机单价分别为 600 万和 800 万元; 一台风力机的年运行维护费用约为 2 万元; 风力机的年利用小时数约为 2000 h, 年利用率约为 20%。网络元件的可靠性数据如表 4 所示。

表 4 元件的可靠性数据

元件名称	元件年故障率	平均修复时间/h
架空线路	0.176/(次/km.年)	3
风力发电机	5.791/(次/台.年)	60

2.1 算例简介

由于尚没有统一的主动配电网算例模型, 这里采用 IEEE14 节点配电系统进行分析, 其网络拓扑结构如图 1 所示。

IEEE14 节点配电系统具有三条馈线, 系统基准容量为 100 MVA, 基准电压为 23 kV, 网络总负荷为 $28.7+j7.75$ MVA。拟接入的分布式电源为双馈风力发电机, 其接入的容量采用 1.5 MW 或 2 MW 机型。未接入分布式电源的电网初始网损为 657.72 kW, 最大节点电压偏移为 0.047 8 p.u.。

2.2 分布式电源的优化规划方案分析

采用遗传算法计算低碳优化目标函数, 以得到

表 5 主动配电网的分布式电源优化规划结果

接入点	容量/MW	P_{loss}/kW	年节约 费用/万元	节点最大 电压偏移/p.u.	系统平均 可靠性	减少的 CO ₂ 排放量/kg	减少的有毒 气体排放量/kg	综合评分
7	9	639.35	291.32	0.047 8	99.996 43	4 421.02	26.83	0.522 32
9	15	384.94	309.97	0.019 7	99.998 46	13 346.9	81.11	0.749 27
14	5	624.67	278.89	0.047 8	99.996 85	3 531.72	21.43	0.506 45

3 结论

主动配电网规划从数学概念上而言, 涉及多个目标, 具有不确定性、非线性、动态等复杂特征。本文构建主动配电网低碳优化的目标函数模型综合考虑了分布式电源的年节约费用、配电网电压偏差、配电网平均供电可靠性和二氧化碳、有毒气体的排放量等指标, 采用隶属度函数对各指标值进行隶属化, 并引入 1-9 标度理论为各指标权重赋值, 避免指标过多情况下权重赋值主观性过强。本文的低碳优化目标函数的构建思路可以为主动配电网分布式电源接入的优化方案提供参考, 但是要针对主动配电网提出能够同时处理多元复杂特性的规划实用方案, 还需要开展更加深入广泛的研究工作。

参考文献

- [1] 范明天, 张祖平. 主动配电网规划相关问题的探讨[J]. 供用电, 2014(1): 22-27.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping. Research on the problem of active distributed network[J]. Distribution and Utilization, 2014(1): 22-27.

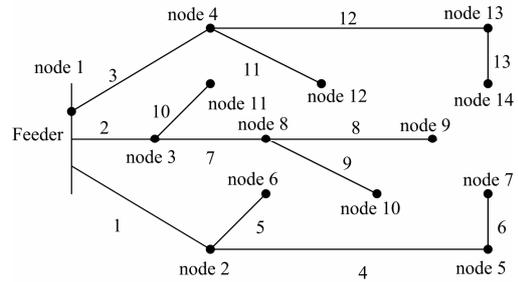


图 1 IEEE14 节点网络拓扑结构图

Fig. 1 Network topology of IEEE 14

主动配电网的分布式电源最优规划方案, 其结果如表 5 所示。

由表 5 可以得出, 针对算例系统的常规运行方式, 在 9 节点接入 15 MW 的风力机, 综合评分最高, 故为主动配电网的分布式电源接入的最佳位置和最优容量。

- [2] MARTINS V F, BORGES C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.
[3] BORGES C L T, MARTINS V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 107-116.
[4] FAN M, SU A, ZHANG Z. A planning approach for active distribution networks[C] // 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, 2011: 1-4.
[5] AI KAABI S S, ZEINELDIN H H, KHADKIKAR V. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 1-9.
[6] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution

- network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [7] 钟清, 余南华, 孙闻, 等. 主动配电网分布式电源规划及经济性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 82-86.
ZHONG Qing, YU Nanhua, SUN Wen, et al. Distributed generation planning and economic anylasis of active distributed network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(11): 82-86.
- [8] 叶承晋, 黄民翔. 基于改进粒子群算法的分布式电源经济性最优规划[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 126-132.
YE Chengjin, HUANG Minxiang. Distributed power optimally economy planning based on modified discrete particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 126-132.
- [9] 钱科军, 袁越, 石晓丹. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11-17.
QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11-17.
- [10] 庄园, 王磊. 分布式电源在配电网中优化选址与定容的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 73-78.
ZHUANG Yuan, WANG Lei. Research of distributed generation optimal layout and capacity confirmation in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 73-78.
- [11] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.
LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108.
- [12] 黄慧, 顾波. 改进遗传算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 64-67.
HUANG Hui, GU Bo. Application of improved genetic algorithm in the network planning[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 64-67.
- [13] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.
MA Xiufan, CUI Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.
- [14] 吴万禄, 韦钢, 谢丽蓉, 等. 基于机会约束规划的风电源与充电站的优化配置[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1): 81-86.
WU Wanlu, WEI Gang, XIE Lirong, et al. Optimal configuration of wind generation and charging station based on chance constrained programming[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1): 81-86.
- [15] 周文越, 吕飞鹏, 廖小君. 基于人工蜂群算法的分布式电源规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 39-43.
ZHOU Wenyue, LÜ Feipeng, LIAO Xiaojun. Distrubuted generation planning based on artificial bee colony algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(5): 39-43.
- [16] 潘明炜, 杜松怀, 苏娟. 多场景随机风速条件下的配电网风电机组选址定容[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(5): 92-98.
PAN Mingwei, DU Songhuai, SU Juan. Wind turbine generator locating and sizing under the condition of multi-scenario random wind speed in distributed network[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(5): 92-98.

收稿日期: 2014-10-21; 修回日期: 2015-01-21

作者简介:

张跃(1987-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统分析和配电网规划领域的研究与工作; E-mail: yuetju@163.com

杨汾艳(1982-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事交直流电力系统分析与电网规划领域的研究与工作; E-mail: yang-fenyang@163.com

曾杰(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析和可再生能源领域的研究与工作。E-mail: zjhust@gmail.com

(编辑 魏小丽)