

Micro-grid Generation Scheduling Analysis Based on Improved Genetic Algorithm

Huizheng Ji¹, Dongxiao Niu¹, Meiqiong Wu¹, Bingjie Li^{2†}

1. North China Electric Power University, Beijing, 102206, China.

2. STATE GRID JIANGSU ECONOMIC RESEARCH INSTITUTE, Nanjing, 210000, China.

†Email: jinpeng_q@163.com

Abstract

As one of the key technologies of the future energy supply, micro-grid has a lot of technical problems need to be solved. After analyzing the similarities and differences between micro-grid and other energy sources, the economic, reliability and environmental protection are used as the basis of system analysis. The power of the power generation characteristics and energy dissipation characteristics to establish mathematical model, based on hierarchical analysis method, the different operation strategy of multi objective function constructed as a single objective model. Finally, combined with the improved genetic algorithm to solve the model. Case analysis shows that the results obtained by the proposed model are consistent with the actual situation, and can get more accurate optimal power scheduling.

Key words: Micro grid; scheduling; AHP; improved genetic algorithm

基于改进遗传算法的微电网发电调度 分析*

纪会争¹, 牛东晓¹, 吴美琼¹, 李冰洁²

1. 华北电力大学, 北京, 102206

2. 国网江苏省电力公司经济技术研究院, 南京, 210000

摘要: 微电网作为未来能源供应的关键技术之一, 其优化配置仍存在大量的技术问题需要解决。在分析了微电网区别于其他能源型式的异同点之后, 以经济性、可靠性、环保性作为系统分析基础, 考虑了包含多种能源型式的微电网调度规划问题。对各电源的发电特性以及耗能特性建立数学模型, 基于层次分析法将不同运行策略下的多目标函数构建为单目标模型, 最后结合改进遗传算法求解模型。实例分析表明, 该模型计算得到得结果与实际情况相符, 可以得到较为准确的最优电源调度规划。

关键字: 微电网; 调度; AHP; 改进遗传算法

引言

随着经济水平的不断发展, 近年来电力需求也在快速增长, 特别是火电、水电等大型的集中电源以及超高压技术发展上取得了较大的进步。但是另一方面, 在电网规模不断扩大的同时, 超大规模电力系统所存在的缺点也开始呈现出来, 建设过程中成本高, 后期运行难度较大, 但是电力用户对电网系统的安全性以及可靠性的要求也越来越高, 导致大型电力系统与电力需求开始存在不相符的情况。为解决这一问题, 有学者提出了微电网技术, 并且已经推向市场, 但其优化配置仍存在大量的技术问题需要解决。

针对如何确定微电网的最优规划配置的问题, 已有众多学者进行了相关探索。文献[1]对微电网的并网与孤岛运行方式 2 种运行方式进行了分析, 并由此提出了一种微电网控制策略。文献[2]针对微电网入网的问题,

提出了一种含微电网的配电网无功优化方法；文献[3-5]从不同的角度提出针对微电网的运行经济性评价指标体系，并对微电网经济运行情况进行评价分析；文献[6]在微电网运行策略的研究基础上，分析了不同运行状态的发生概率，并研究得到微电网可靠性评估模型。从上述研究综述可以发现，大多数微电网研究仍停留在单方面的角度上，或从电网的经济性进行规划分析，或从可靠性方面进行研究，而没有系统的从多层次对微电网规划技术进行讨论。因此本文综合考虑微电网的经济性、可靠性以及环保性能方面，构建了基于改进遗传算法的孤立微电网规划模型，结合实例数据分析，证实了本文提出的模型的准确性与可靠性。

1 微电网技术介绍

相对传统大电网，微电网是一个新的概念，系统与传统电网一样，也包含了多个分布式电源，并且按照一定的拓扑结构组成，然后通过静态开关接入常规电网中。微电网作为一个小型发电系统，由分布式电源、能量转换装置、储能装置、保护装置以及相关负荷和监控组成，并且能够独立实现自我控制、管理并保护的独立系统，同时该系统不仅能够孤立运行，还可以与外部电网并网运行^[7]。

微电网与其他形式的系统进行比较，见表 1 所示。

表 1 不同系统与微电网的异同点

不同系统与微电网的异同点	微电网	
	相同点	区别
大电网	1) 都是电力的传输通道； 2) 具备变配电、继电保护等； 3) 调节能量平衡，满足负荷需求。	1) 规模不同； 2) 电压等级不同； 3) 电源对象不同； 4) 适用对象不同。
后备电源	可离网独立供电	微电网可支持多种电源。
分布式发电	一般采用新能源	分布式发电是并网或单一电源；微电网可支持多种电源。
蓄能	可离网独立供电	普通的储能系统是并网型的；微电网可并可孤。

可见，微电网在功能上最接近大电网，微电网具备完整的保证电网稳定运行的控制功能，与大电网相比，微电网只是规模较小、电压等级较低、适用面较窄。而微电网存在的主要技术问题见表 2 所示。

表 2 微电网主要技术问题

对比指标		技术问题
微电网规划主要 技术问题	可靠性	稳定供电可靠
		可以无缝切换
		中央控制中功率平衡
	经济性	分布式电源即插即用
		能量管理上功率平衡
		监控系统及高级应用
	环保性	储能、电源、负荷经济调度
		CO ₂ 排放量

2 构建微电网动态多目标规划模型

2.1 分布式电源发电模型

在建立微电网多目标综合规划模型之前，需要先对微电网系统中各分布式发电单元和储能装置建立数学模型，通过建立各分布式发电单元和储能装置的数学模型了解其发电特性以及耗能特性，为后面建立微电网动态规划模型打下基础。

2.1.1 风力发电

微电网中风力发电机组功率与风速存在较强得关联性，而由于风速是随时间不断变化，导致风力发电机组出力也具有随机性。因此，在计算风力发电机组出力之前，需要研究风速的随机分布情况，通过风速的确定，可以计算出涡轮机的实际出力。用于拟合风速分布的理论有多种，但最常用的是威布尔(Weibull)分布^[8]，威布尔分布计算公式如公式 1 所示。

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中： v 代表实际风速； c 代表尺度系数，说明地区平均风速的大小； k 代表形状系数，用来描述风速分布密度函数的形状。

用如下的分段函数描述风电出力 P_f 与风速间的关系：

$$P_f = \begin{cases} 0 & (v < v_{in}, v \geq v_{out}) \\ \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}} P_r & (v_{in} \leq v < v_r) \\ P_r & (v_r \leq v < v_{out}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_r 为风机的额定出力， v_{in} 为切入风速； v_{out} 为切出风速； v_r 为额定风速。

2.1.2 光伏发电

太阳能作为一种丰富的可再生能源，具有许多优点：不消耗燃料、维护简单、无污染和噪声、安全可靠及等；光伏发电是将丰富的太阳能通过静态转换装置转换成电能，转换过程不需要热力发电机和传动部件。但光伏电池的输出功率易受外部天气变化的影响，外部环境温度和太阳辐射强度的随机变化，使得光伏输出功率具有随机性和不均匀性，有必要研究太阳光照强度的随机分布情况。在本文中，为简化计算过程，设光照强度服从贝塔分布，因此其概率密度函数^[1]可以用下式表示：

$$\begin{aligned} f(G(t)) &= \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{G(t)}{G_{\max}}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{G(t)}{G_{\max}}\right)^{\beta-1} \\ \alpha &= \mu \left(\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \\ \beta &= (1-\mu) \left(\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

上式中， α 和 β 是形状参数， $G(t)$ 为 t 时段的光照强度， Γ 为伽马函数； G_{\max} 为最大的光照强度。光伏阵列的输出功率可用下式表示^[9]：

$$P = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} (1 + k(T_c - T_r)) \quad (4)$$

式中： P 是光伏太阳能板的输出功率； P_{STC} 是标准测试条件(太阳能电池表面温度为 250C，光照强度为 1000 W/m²)下光伏太阳能电池板的额定功率； G_{ING} 、 G_{STC} 是瞬时太阳辐射强度与标准测试条件下的太阳辐射强度； k 是光伏电池的温度系数； T_r 、 T_c 分别是电池参考温度与标准测试条件下的电池温度。

2.1.3 燃气轮机发电

本文所设计的微电网系统中的分布式燃气轮机主要是小型燃气轮机，其以甲烷以及天然气等为燃料。相对于传统发电设备，小型燃气轮机也有许多优点：发电效率高、体积相对较小、燃料的消耗率低、污染少并且维护简单，适用性较高，能够应用于边远地区以及中心城市等各个地方。根据不同的应用场合，微电网中的主要设备选择和配置方式也会有所不同。

在小型燃气轮机运行过程中，发电功率和燃料的消耗成本间的数学关系可以用下式表示：

$$F_{FC} = F_f \sum_t \frac{P_t}{\eta_t} \quad (5)$$

式中， F_{FC} 为燃气轮机发电成本； F_f 为燃料价格； P_t 为 t 时段输出功率； η_t 为 t 时段燃气轮机的效率，可通过燃气轮机典型效率曲线获得(一般出力越大对应的运行效率越高)。

2.1.4 蓄电池

微电网系统中包含的一个重要能源就是储能系统，由于微电网中包含有可再生能源，储能系统这时能够保证可再生能源机组输出功率的平衡，确保微电网的稳定运行，改善系统的电能质量，并且参与需求侧能量管理，以实现微电网的经济高效运行。储能单元能在可再生能源充足的时候，储备多余的能量，减少能源的浪费；而在可再生能源匮乏的时候，为负载提供稳定的电力输出；在某种特殊情况下，当分布式发电单元发生故障时向负荷提供电力支持，提高系统正常安全的运行能力，因此蓄能设备能解决电能的延时性调节问题，提高能源系统的容错能力。

铅酸蓄电池储能是目前技术最成熟的一种储能设备，也是目前微电网中应用最广泛的储能设备，具有容量大、价格低、可深度充放电等优点。本文主要以铅酸蓄电池为研究对象。在运行过程中，铅酸蓄电池处于充电状态时满足下式：

$$S_{oc}(t+1) = S_{oc}(t) + P_t^c \eta_c \Delta t \quad (6)$$

处于放电状态时，满足：

$$S_{oc}(t+1) = S_{oc}(t) - P_t^d \Delta t / \eta_d \quad (7)$$

式中， $S_{oc}(t+1)$ 、 $S_{oc}(t)$ 分别为 $t+1$ 时段和 t 时段铅酸蓄电池的剩余容量； P_t^c 、 P_t^d 分别为 t 时段铅酸蓄电池的充、放电功率； η_c 、 η_d 分别为铅酸蓄电池的充、效率； Δt 为两时段间的时间间隔。

2.2 构建目标函数和约束条件

在本文所建立的微电网系统中，包含了风能与光伏可再生能源，还有微型燃气轮机和蓄电池等装置，在分析微电网系统最优调度模型时，为合理地表现各能源型式在微电网运行情况，本文在分析过程中不考虑各能源型式的初期投资成本，只对运行维护以及燃料费用进行计算考虑；同时，由于环境问题日益严重，在建立模型时考虑了第二个目标函数，即微电网运行下的污染物排放治理费用。

2.2.1 目标函数

(1) 多目标分析

以燃料费用与运行维护的总成本最小为目标函数，本文以构建微电网系统的电源出力调度优化配置模型。对于燃料费用，不同的微电源之间存在着很大不同。光伏发电、风力发电消耗的是可再生能源，能源取之不尽，所以光伏以及风能不需要考虑燃料成本。而微型燃气轮机主要消耗的是化石燃料能源，燃料成本不可忽略。本文构建的目标函数表达式如下：

$$\begin{aligned}\min C &= C_y + C_r \\ C_y &= \sum_{i=1}^N P_i K_i \\ C_r &= \sum_{i=1}^N f(P_i^t) \cdot C_p^i\end{aligned}\quad (8)$$

上式中， C 是系统运行的总成本； C_y 指代运行维护费用； C_r 指代运行过程中的燃料费用； N 为分布式电源的种类数； P_i 是第 i 种电源的装机容量； K_i 为第 i 种电源种类在运行维护中的成本比例系数，单位为 $\$/ (kW \cdot a)$ ； $f(P_i^t)$ 是 t 时刻 i 发电单元的燃料总量； C_p^i 是 i 发电单元所用天然气的单位价格。

微电网的清洁和低碳特性尤为值得关注，其在推动能源结构调整、可再生能源发展等方面，具有重要的战略意义。因此，本文以微电网污染物排放所折算的成本作为第二个规划目标^[9]，系统中主要排放物为 CO_2 ，其排放量成本计算公式见**所示。

$$\min C_{CO_2} = k \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \beta_i P_i^t \quad (9)$$

式中：设 k 是 CO_2 排放的综合价值系数； T 为总运行时间； β_i 为第 i 台微电源的 CO_2 排放系数； P_i^t 为第 i 台微电源的输出功率。

(2) 构建单目标模型

层次分析法(AHP)可以用来有效解决多目标问题，特别是针对定性与定量相结合的决策分析问题有较强的适用性，本文基于层次分析法来确定各目标的权重，以此构建微电网运行成本的单目标模型。以表 2 为层次分析基础，依次构建模型的目标层、准则层、指标层，其中本文以指标层代替常规层次分析模型中的方案层。微电网运行目标策略的重要性，即经济性目标与污染物排放目标的相对重要性决定了各指标权重的排序，本文主要研究分析了这两种策略之下的出力成本。

设归一化后得到准则层的权重向量为 $w=[w_1, w_2]$ ，上述微电网多目标整合为单目标动态规划模型的目标函数为：

$$\min M = w_1 C + w_2 C_{CO_2} \quad (10)$$

2.2.2 约束条件

根据电网运行特点，约束条件主要包含了下列三个：

(1) 功率平衡约束

$$P_d^t + P_{loss}^t = \sum_{i=1}^N P_{Gi}^t \quad (11)$$

式中： P_d^t 、 P_{loss}^t 、 P_{Gi}^t 分别代表了 t 时段的系统负荷、输电损耗以及各微电源的功率。

(2) 微电源出力约束

$$P_i^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_i^{\max} \quad (12)$$

式中： P_i^{\min} 、 P_i^{\max} 分别为微电源 i 的输出功率的下限和上限。

(3) 铅酸蓄电池充放电约束

铅酸蓄电池在充放电过程中，受其最大充放电功率和容量的限制。铅酸蓄电池的额定功率限制可用下式表示：

$$\begin{aligned} 0 \leq P_t^c \leq P_{c,\max} \\ 0 \leq P_t^d \leq P_{d,\max} \end{aligned} \quad (13)$$

式中， P_t^c 、 P_t^d 分别为 t 时段铅酸蓄电池的充、放电功率； $P_{c,\max}$ 、 $P_{d,\max}$ 分别为最大充、放电功率。

2.3 改进遗传算法

为求解上述微电网动态规划模型的最优配置，本文使用一种新的改进遗传混合算法^[10]。该算法有效地结合了蚂蚁算法以及遗传算法，并交叉调用两种算法。这种交叉调用策略结合了两种算法的优点，使这种改进的遗传算法不仅可以得到全局搜索速度，还可以得到局部寻优能力。该算法的具体流程如下：

步骤 1：输入微电网中各电源的原始数据，初始化设置遗传过程的最小、最大迭代次数、混合算法的最大迭代次数分别为 G_{\min} 、 G_{\max} 、 K_{\max} 等；

步骤 2：初始化蚂蚁的位置；

步骤 3：判断前面的计算路径是否形成完整路线，如果得到完整路径，使用蚂蚁算法对信息素进行更新计算，然后转步骤 5；否则转步骤 4；

步骤 4：根据蚂蚁状态转移规则选择下一节点；

步骤 5：将蚂蚁找到的初始解和全局最优解作为遗传算法初始种群。如果混合算法的整体迭代次数 K 小于等于迭代调整阈值 ε ，则遗传算法进行选择、交叉、变异、更新群体操作；然后与迭代调整阈值 ε 进行比较，如果大于该值，则遗传算法进行变异、更新群体这两种操作。

步骤 6：判断是否大于遗传算法最小迭代次数 G_{\min} 。如果是小于等于 G_{\min} ，则继续进行一系列的遗传操作；如果大于 G_{\min} ，进行最佳融合点评估；如果种群不满足评估策略，则继续进行一系列的遗传操作。在每次遗传操作的最后，进行信息素更新。如果满足评估策略，则转步骤 8。

步骤 7：判断是否达到遗传算法最大迭代次数。如达到，则进行下一步骤；否则继续进行遗传操作。

步骤 8：对全局最优解进行更新，结合全局最优解对信息素进行更新操作。

步骤 9：判断 K 是否达到 K_{\max} 。若没有达到 K_{\max} ，则判断 K 是否小于等于迭代调整阈值 ε ；如果小于等于，则直接转步骤 2；如果 K 大于 ε ，则转步骤 2，并增加蚂蚁算法的初始解规模。达到 K_{\max} ，输出最优解，算法结束。

3 实例分析

以上述简化的微电网系统为例，综合考虑其系统运行成本和污染物排放量，采用隶属度函数将多目标优化问题转化为单目标优化问题后运用改进遗传混合算法求解。设置某地的日负荷曲线、自然光照和风速作为系统参数，风机的切入风速为 3.5m/s。CO₂ 的排放来源主要是燃气轮机，其排放系数为 1.078g/kWh，综合价值系数为 0.21 元/kg，同时，燃气轮机的燃料耗量系数为 0.409m³/kWh，运行维护成本系数为 0.04109 元/kWh。燃气轮机的天然气价格采用该市当年的价格为 2.53 元/m³。微电网系统中光伏电池(PV)、风力发电机(WT)、燃气轮机(MT)、铅酸蓄电池(LA)的额定功率与出力约束条件见表 3 所示。

表 3 各发电源额定功率与出力约束条件

	PV	WT	MT	LA
额定功率	35KW	45KW	40KW	40KW
出力约束	0~50	0~60	0~60	-50~50

3.1 运行结果分析

结合上述各机组的参数条件与风速、光照等自然因素，使用改进遗传算法对各机组 24 小时的出力进行优化。模型中对两个目标权重的设置决定了微电网电源出力的最优配置，本文分析在两种运行策略下的规划模型：①优先考虑污染物排放目标，通过层次分析得到 $w=[0.42,0.58]$ ；②优先保证得到较低的经济成本，计算可得 $w=[0.65,0.35]$ 。两种模型的最优出力曲线见图 1 和图 2 所示。

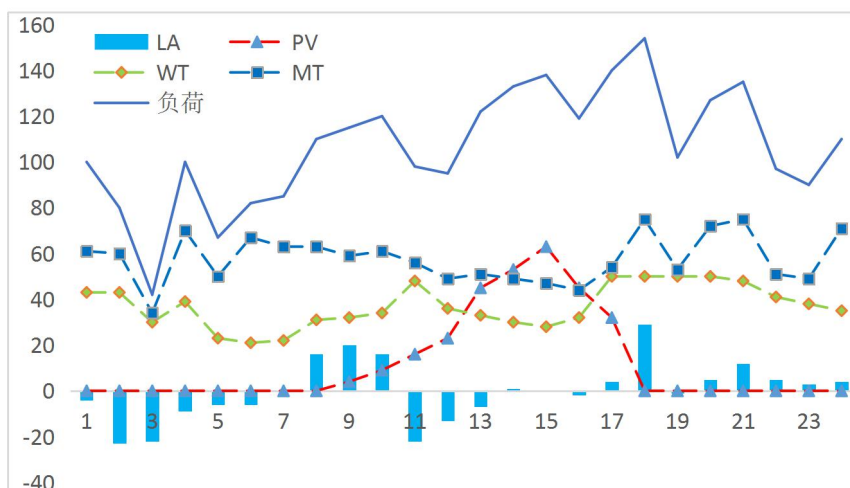


图 1 策略 1 下的各机组的最优出力曲线

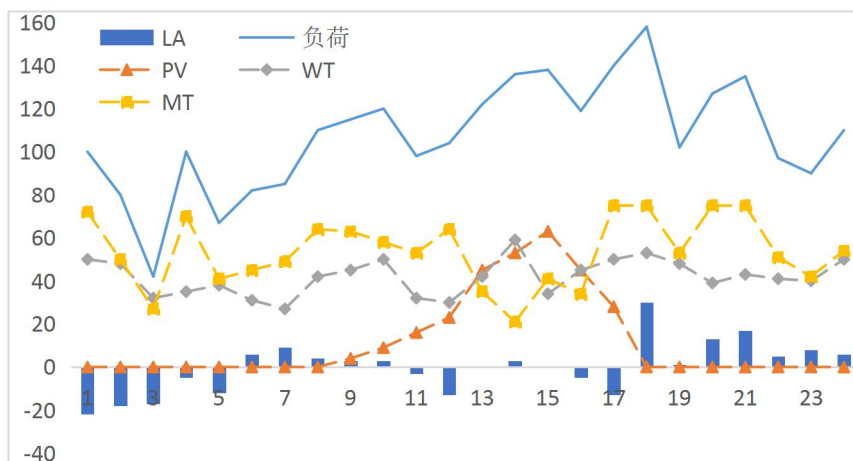


图 2 策略 1 下的各机组的最优出力曲线

在上两图中，观察蓄电池柱状图，当蓄电池功率为负时，此时蓄电池处于充电状态；相反，正值说明蓄电池充当电源作用。在 0~8,18~24 这两个时间段，光照较弱，光伏发电不参与电网调配；同时，蓄电池在这两个时段中进行充放电，在 0~8 时刻，微电网总负荷较小，此时参与做功的主要电源是风机与燃气轮机，并且将多余的电能用于蓄电池存储，而在 18~24 时段，此时随着风速以及光照的降低，常规机组出力不足，因而蓄电池在电网中发挥主要调节作用。对比上图，可以发现在两种不同的电网目标策略下，各电源的分配情况和运行成本等也存在较大差距，见表 4 所示。即当 $w=[0.42,0.58]$ 时，考虑的是在环保水平的最优化，各

电源之间进行相互调节，虽然燃气轮机的 CO₂ 排放量大，但由于其容量较大，且燃料成本较小，因此也是微电网中的主要电源之一，并且模型的最优值在策略 1 的调节下小于策略 2；而当 $w=[0.65,0.35]$ 时，优先考虑的是得到微电网运行的经济成本，由于燃料消耗成本较小，因此主要用来承担电网负荷，风能参与剩余的负荷调配，由表 4 可得，在此策略下，微电网得到的运行经济成本为 1409.22，相对小于策略 1 下得到的 1464.33，但 CO₂ 的排放成本却明显大于策略 1 中的成本。

表 4 最优运行结果

	模型最优值/元	运行成本/元	CO ₂ 排放成本/元
策略 1	1464.33	1258.52	205.81
策略 2	1409.22	1104.64	304.58

4 结语

本文从微电网存在的可靠性、经济性、环保性这三个主要技术问题出发，对包括了燃气轮机、风电机、光伏机组和铅酸蓄电池的微电网发电调度规划问题进行建模分析。首先分别对各电源的出力特点进行数学建模，综合考虑微电网系统运行成本和污染物排放成本，采用 AHP 模型将可靠性、经济性、环保性的多目标优化问题分别进行权重分配，进而转化为单目标优化问题，然后运用改进遗传混合算法求解。仿真结果表明改进遗传混合算法在该模型中具有较好的运算效果，在综合考虑经济性与环保性能这两种不同的运行策略下使用不同的电源调度出力规划可以得到最优的模型目标值。算例分析表明，本规划模型以及分析方法计算得到的结果与实际情况相符，对于微电网规划和运行具有较好的指导作用。

REFERENCES

- [1] YANG Qi, MA shiying, TANG xiaojun, LI xiaojun. Evaluation Index System Construction and Application of Microgrid Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 13-17.
- [2] WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 19-23..
- [3] LIU Zhuangzhi. Research on theory and application of snuirt distribution network planning including micro-grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013: 1-132.
- [4] ZHAO He,WANG Kun,JING Tianjun. Economic Analysis of Micro-Grid in Energy Self-Balance Mode[J]. Electric Power Construction, 2014,35(5): 113-117.
- [5] DONG Xiaobo, JIAO Liqiang, TAN Lei. Evaluation of Micro-Grid in economic benefit[J]. Technology Wind, 2013: 217-218.
- [6] CHEN Anwei. Research on the Technical Economic Problems of the Smart Grid[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 1-165.
- [7] LI Chengxi, YANG Qiang, YAN Wenjun. Dynamic islanding operation of microgrid with distributed photovoltaic generators[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 99-105.
- [8] MA Wei, LV Lin, LIU Yaobo, TANG Xian'gang, SHUI Yiqin, WANG Xiaoyin.Grid-Connection Plannning of Microgrid Based on Reliability[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 221-226.
- [9] SHEN Yuming. Optimal Capacity Models of Ditributed Generating Units and Optimal Operation Models for Microgrid[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 1-61.
- [10] LIANG Xu, LIU Pengfei,HUANG Ming. Application of new dynamic ant algorithm-genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008,14(8): 1566-1570.

【作者简介】



¹纪会争（1974-），男，硕士研究生，高级工程师，研究方向为电力技术经济。Email: jbgswlb@126.com

²牛东晓（1962-），男，博士研究生，教授，研究方向为电力技术经济及电力项目管理。

³吴美琼（1992-），女，硕士研究生，研究方向为电力技术经济。