

DOI: 10.7667/PSPC151751

基于多目标评判法的微电网经济性指标研究

田梁玉, 唐忠, 焦婷, 朱瑞婷

(上海电力学院, 上海 200090)

摘要: 目前, 国内外微电网还处于试验示范阶段, 尚未实现商业化运行。对于微电网的经济性研究还很有限。因此, 提出了微电网经济性评判的一些指标: 综合成本、经济效益、可靠性代价以及环境效益等。以华东地区首个校园微电网示范工程——上海电力学院微电网示范工程为实例, 用多目标评价函数法对其作出经济性评价。该方法验证了在一定的时间内微电网可以实现盈利目的。

关键词: 微电网; 经济性指标; 多目标评价函数; 华东地区校园; 示范工程

Economic indicators research of microgrid based on multi-objective evaluation method

TIAN Liangyu, TANG Zhong, JIAO Ting, ZHU Ruiting

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: At present, the microgrid is still in the experimental demonstration stage, has not yet been commercialized operation. It is still very limited for microgrid economy research. This paper presents some indicators including comprehensive cost, economic efficiency, reliability and environmental benefits. It takes the Shanghai University of Electric Power microgrid demonstration project which is the first school in the east of China as an example and uses the multi-objective evaluation function to make the economic evaluation. It is verified that the microgrid can attain the goal of profit in a certain period of time using this method.

Key words: microgrid; economic indicators; multi-objective evaluation function; east campus; demonstration project

0 引言

微电网是一个包含分布式供电系统、储能装置和用电负荷的小型供电系统。它一般处于配电网末端, 是一种新型的供电网络。既可联网微电网供电, 也可独立于大电网供电。目前微电网研究的分布式能源主要是风能和光伏, 以蓄电池作为储能装置, 通过柴油发电机来稳定系统的电压与频率, 实现向目标负荷供电的功能。文献[1]就是利用这种典型的微电网模型, 主要以环境效益为经济模型, 来验证所提出的控制策略能提高微电网运行的经济性。但其仅考虑了微网运行成本、环境效益和储能寿命这三个指标, 指标体系不够完整。文献[2]从安装地点特性、机组随机性及特殊负荷三个角度对多能源微电网的优化配置及经济运行模型进行了研究, 其经济性模型只考虑了综合成本。目前, 微电网的研究主要集中于两个方向: 控制策略研究^[3-11]和微电网的某一指标的经济性研究^[12-14], 两者的研究相辅相成。文献[5]针对多种分布式能源组成的微网能量管

理框架, 采用分层控制, 侧重于水电系统的研究, 未能发挥多种分布式能源的组合优势。文献[8]针对微电网的孤岛运行, 采用了平均成本的下垂控制策略, 通过控制分布式电源的功率输出来减少微电网的总发电成本, 侧重于控制策略的研究。文献[10]针对微电网并/离网的切换过程, 采用了交直流混合母线微电网的拓扑结构与逆变器控制策略, 探讨了不同切换模式的控制算法, 减小了切换过程中电压和频率的波动。文献[12]针对含风-光-柴-蓄的微电网独立系统, 采用改进型非劣排序遗传算法结合铅酸蓄电池的优势, 探讨了在设备成本、运行和维护成本、燃料成本和环保成本等指标体系下的微电网经济优化运行, 侧重点在于对铅酸电池的保护利用, 没有考虑到分布式能源组合带来的优势。文献[14]针对微电网的可靠性与经济性的协调性, 侧重于微电网的运行、微电源故障以及负荷需求所带来的停电损失, 研究的面不够全面。

本文针对由风力发电机、光伏系统、微型燃气轮机以及储能系统与负荷组成的微电网提出多目标

规划法, 综合考虑微电网的经济性指标, 包括综合成本、经济效益、可靠性代价和环境效益四个方面, 来评判微电网是否可实现经济性盈利。

1 分布式电源的数学模型

微电网的经济优化问题是在确保各分布式电源出力与负荷平衡的前提下, 优化安排各分布式电源的出力, 实现微电网总体效益的最大化。不同的运行策略对应不同的出力结果, 因此从微电源的数学模型入手, 分析其运行特性, 之后结合综合成本、经济效益、可靠性代价和环境效益这四个指标, 运用多目标函数评价法来研究微电网的经济优化策略。

1.1 风力机组发电模型

风力发电机^[15]主要由风力机、发电机、整流器、变压器等部分组成, 其结构图如图 1 所示。

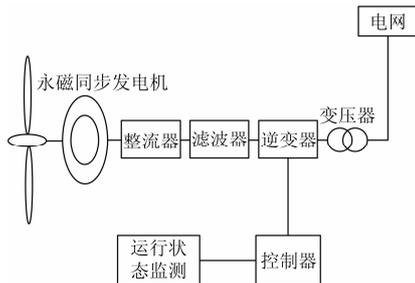


图 1 风力发电机
Fig. 1 Wind turbine

风力发电机的工作原理是通过将风能转化为机械能再转化为电能。由于风力发电具有随机性和间歇性的特点, 因此根据发电机的特性就要求风机有一定的切入速度和切出速度的选择。当风速小于风机的切入速度, 发电机不工作; 当风机增大到切入速度时, 发电机组并网运行; 当风速达到风机的额定风速时, 其输出功率刚好维持在额定输出功率; 当风速继续增大时, 就达到了风机的切出速度, 此时风机停止工作。通过对风速的预测, 可得到风机的出力。

1.2 光伏发电模型

光伏发电主要是通过太阳能电池吸收光来产生电能, 太阳能电池即光伏电池, 其等效电路如图 2 所示。

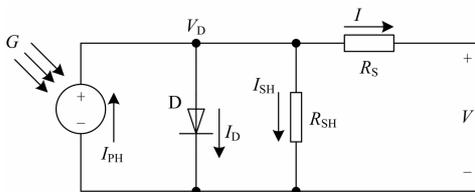


图 2 光伏电池等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of PV battery

光伏电池的运行特性与光照强度以及光伏电池的运行温度有关, 通过预测光照强度和环境温度结合光伏电池的输出特性, 可得到光伏电池的出力。

1.3 微型燃气轮机发电模型

微型燃气轮机发电机主要由微型燃气轮机、逆变发电机和控制器组成。工作原理为从离心式压缩机出来的高压空气先在回热器内由涡轮排气预热, 然后进入燃烧室与燃料混合、燃烧, 高温燃气送入向心式涡轮做功, 带动高速发电机发电。微型燃气轮机由于输出功率的稳定性优点, 通常在微电网分布式新能源发电中充当功率平衡的作用。

1.4 蓄电池发电模型

由于风力发电和光伏发电都会受到环境因素的影响, 因此有一定的波动性。而储能装置在微电网中就可以起到稳定的作用, 即分布式新能源所发的多余电可以储存到储能装置中, 当发电不足时, 还可以提供电能, 保证系统的正常运行。蓄电池的主要参数为储存能量约束和充放电功率约束, 通过对蓄电池的荷电状态的估算, 可以加大对蓄电池组的利用效率与使用寿命。

2 微电网的经济性指标

目前微电网的建设都是示范性工程, 没有盈利模式的实例, 因此本文结合目前微电网的各种投资和大电网经济性评价指标, 来尝试对微电网作出经济性评价。微电网的经济性指标主要有综合成本、经济效益、可靠性代价和环境效益等, 评价指标体系如图 3 所示。

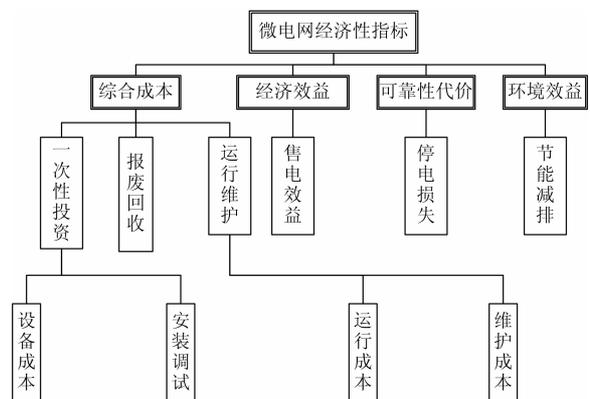


图 3 微电网经济性评价指标体系

Fig. 3 Indicator system of micro grid economy evaluation

2.1 综合成本

综合成本效益是各部分成本的总和, 包括: 一次性投资成本、运行维护成本以及报废回收效益。其中一次性投资成本又包括设备的成本和安装调试成本; 运行维护成本主要是运行成本和维护成本之

和;报废回收主要是指设备寿命结束时的回收效益。

$$W_Z = (1 + N \sum_{\Omega=1}^2 \mu_{\Omega} + \psi) \times W_1 \quad (1)$$

$$W_1 = \sum_{j=1}^m C_j P_j + W_A \quad (2)$$

式中: W_Z 为各部分的总成本; W_1 为一次性投资成本; $N \sum_{\Omega=1}^2 \mu_{\Omega} W_1$ 为运行维护成本; ψW_1 为报废回收效益; C_j 为第 j 种微电源的装机成本; P_j 为第 j 种微电源的总装机容量; W_A 为安装调试成本; N 为设备寿命; μ_1 为年运行成本系数, 一般取 2%(设备寿命 15~25 年); μ_2 为年维护成本系数, 一般取 1%(设备寿命 15~25 年); ψ 为设备回收系数, 一般取 8%(设备寿命 15~25 年)。

2.2 经济效益

经济效益主要是微电网运营商从事电量交易活动时的售电效益。

$$W_j = N \times \sum_{j=1}^n h_j l_j P_j \quad (3)$$

式中: W_j 为售电效益; h 为年发电利用小时数; l_j 为上网电价。

2.3 可靠性代价

可靠性代价主要是指微电网发生故障如电压跌落、频率波动等异常情况时, 为了使微电网中的分布式供电系统在一定程度的电压波动或频率波动下保持较好的控制性能, 需要考虑切机或切负荷等措施。主要用系统年平均停电时间和系统电量不足带来的损失来衡量。

$$W_K = N \times t \times \sum_{j=1}^n l_j P_j \quad (4)$$

式中: W_K 为可靠性代价; t 为年平均停电时间。

2.4 环境效益

传统的电网发电需要消耗大量的煤炭、化石等不可再生能源, 污染物排放严重; 而微电网使用的是清洁的、可再生的分布式能源, 具有明显的节能减排效果。因此, 在评判微电网的经济性指标时, 环境效益要占到很大的比重。这里对环境效益的评估从传统的电网发电所需的环境代价出发, 即微电网的环境效益=传统电网的环境代价。

$$W_H = N \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m Q_{ij} G_{ij} \quad (5)$$

式中: W_H 为环境效益; Q_{ij} 为第 j 种微电源等价于第 i 种气体的减排量; G_{ij} 为第 j 种微电源等价于第

i 种气体的减排效益。

3 微电网经济性各指标综合评价

对于求解多目标规划的问题, 由于有多个目标函数要同时达到最优, 往往是非常困难的, 有所谓就有所失, 在处理这类问题时, 往往将得失控制在最小的合理的范围内。因此在认识到多目标规划问题的困难性后, 可以考虑根据各目标函数的重要性把它按照一定的比重关系, 处理成单目标函数, 从而得出整体的最优规划方案。这种方法通常称为多目标评价函数法, 按照评价函数规则的不同, 还可以分为: 理想点法^[16-17]、平方和加权法^[18]、极小极大法基本原理^[19-20]、乘法基本原理以及线性加权法和法^[21-22]。理想点法通常是先求出 n 个单目标函数的最优值, 分别记作

$$f_i^* = \min_{X \in R} f_i(X), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

然后, 作评价函数

$$h(F) = h(f_1, f_2, \dots, f_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [f_i(X) - f_i^*]^2} \quad (7)$$

再求相应的单目标函数

$$\min_{X \in R} h[F(X)] = \sqrt{\sum_{i=1}^n [f_i(X) - f_i^*]^2} \quad (8)$$

的最优解。这种规划求解法与平方和加权法以及极小极大法都是侧重于单个目标函数的最优值求解, 并没有反映出各个变量所占的权重比会对整个目标函数产生什么样的影响, 因此不能对实际的微电网作出准确的经济评估, 而线性加权法是依据每个目标函数的重要性给予每个函数一定的权重系数, 构成总目标函数

$$h(F(x)) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (9)$$

式中, w_i 为权函数, 满足 $w_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n$,

且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, 然后求解

$$\min_{x \in D} h(F(x)) = \min_{x \in D} \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (10)$$

在做微电网经济性评价指标时, 由于每个微电源对应的指标的重要性不同, 因此每种微电源的单目标函数需要赋予不同的权重系数, 这样构成的总目标函数才能准确地反映出整个微电网的经济性。

4 实例分析

以华东地区首个校园微电网示范工程——上海

电力学院微电网示范工程为实例进行分析, 微电网的运行系统如图 4 所示。

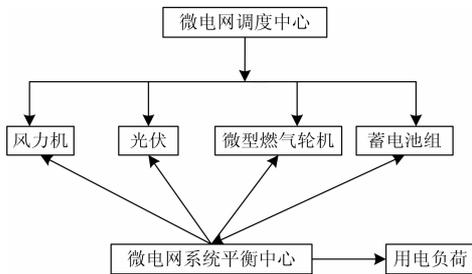


图 4 微电网运行系统

Fig. 4 Micro grid operation system

示范工程中的风力发电机有 3 台是垂直轴的单机容量为 3.2 kW, 有 2 台是水平轴的单机容量为 5 kW, 总容量为 $3 \times 3.2 + 2 \times 5 = 19.6$ kW; 光伏发电系统的总容量为 230 kW; 微型燃气轮机是用来保持无功和有功功率的输出平衡的, 当分布式新能源输出功率不满足微电网的需求时, 由微型燃气轮机来补偿; 蓄电池是用来储能的, 储存微电网中分布式新能源的多余发电量; 微电网调度中心是控制整个系统运行的管理中心, 起到枢纽的核心作用。系统参数见表 1。

表 1 系统计算参数

Table 1 Calculation parameters of system

电源类型	装机成本/ (万元/kW)	总装机容量/kW
微型燃气轮机	1.2	29
风力发电	0.9	19.6
光伏发电	1.05	230

4.1 综合成本

风力发电的成本为 $19.6 \times 0.9 = 17.64$ 万元, 光伏发电的成本为 $230 \times 1.05 = 241.5$ 万元, 微型燃气轮机的成本为 $1.2 \times 29 = 34.8$ 万元, 蓄电池的成本为 106.06 万元, 安装调试成本为 8 万元, 得到一次性投资的成本为 408 万元; 年平均运行成本按一次性投资成本的 2% 计算为 $408 \times 2\% = 8.16$ 万元, 寿命 20 年, 总成本为 $8.16 \times 20 = 163.2$ 万元, 年平均维护成本按一次性投资成本的 1% 计算为 $408 \times 1\% = 4.08$ 万元, 总成本为 $4.08 \times 20 = 81.6$ 万元; 报废回收效益按一次性投资成本的 8% 计算为 $408 \times 8\% = 32.64$ 万元; 综合成本为 $408 + 163.2 + 81.6 - 32.64 = 620$ 万元。

4.2 经济效益

风力发电的上网电价为 0.62 元/kWh, 年发电利用小时为 2 000 h, 则发电效益为 $0.62 \times 2\,000 \times 19.6 = 2.4$ 万元/年; 光伏发电的上网电价为 1 元/kWh, 年发电利用小时为 1 000 h, 则发电效益为

$1 \times 1\,000 \times 230 = 23$ 万元/年; 储能电池的效益主要从减少新能源发电所需的常规备用容量, 可靠性节约成本, 低储高发套利, 减少总网损、减少电网扩建等方面考虑, 合约为 12 万元/年; 经济性效益为 $(2.4 + 23 + 12) \times 20 = 748$ 万元。

4.3 可靠性代价

使用微电网有一个很明显的优势就是根据不同负荷的不同需求可以自由组网、自由切换并网/离网状态及离网/并网的无缝切换, 因此监测到微电网存在潜在不稳定状况时可提前切换到离网状态, 将负荷接到大电网上即可避免停电给用户带来的损失。这里的年停电损失时间按 2 h 计算, 则所需成本为 $(0.62 \times 19.6 + 1 \times 230) \times 2 \times 20 = 1$ 万元。

4.4 环境效益

微电网的环境效益主要是从节能减排方面考虑的, 传统的大电网是利用火力发电机组等方式发电, 其产生的废气污染物主要有 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 、 CO 等, 而微电网利用可再生新能源发电, 不产生废弃污染物。因为废气污染物中 CO_2 产生的量占很大的比重, 因此在评估时只考虑 CO_2 的排放量。计算数据见表 2。

表 2 环境效益计算表

Table 2 Calculation of environmental benefits

种类	二氧化碳减排量/(吨/年)	减排效益/(元/吨)	环境效益/(元/年)
风力发电	180.2	65	11 713
光伏发电	3	65	195

由表 2 得到环境效益为 $(11\,713 + 195) \times 20 = 24$ 万元。

4.5 基于多目标评价函数法的目标函数

本文以风力发电和光伏发电两种新能源发电方式作为研究对象, 因此按经济性的四个指标围绕风、光构建出两个分目标函数 $Z = \lambda_i W_i$ ($i = 1, 2$), 且

$$\sum_{i=1}^2 \lambda_i = 1, \text{ 得到总的目标函数为}$$

$$F(Z) = [(17.64\lambda_1 + 241.5\lambda_2) + 34.8 + 106.06 + 8] \times (3\% \times 20 - 8\%) - (2.4\lambda_1 + 23\lambda_2 + 12) \times 20 + (0.024\lambda_1 + 0.451\lambda_2) \times 20 - (1.1713\lambda_1 + 0.0195\lambda_2) \times 20$$

可简化为

$$F(Z) = 60.2046\lambda_1 + 333.89\lambda_2 + 162.5928$$

对应不同权重系数可得到不同的经济性方案, 见表 3。

由表 3 可以看出, 方案一即只含有光伏系统一种新能源发电时, 得到的经济回报是最大的; 方案二即当风电系统与光伏系统按 1:1 的比例组建微电

网时, 其收益是最少的; 方案三即当全部投入风电系统时, 微电网在 20 年内也能盈利, 但回报是明显没有光伏发电系统的回报多。因此, 可以得出这样

的结论: 在考虑 20 年寿命期内综合成本、经济效益、可靠性效益和环境效益这四个指标时, 光伏发电系统所占的比重越大, 所得到的经济回报越大。

表 3 经济性评价指标表

Table 3 Indicators of economic evaluation

指标	风力机	光伏	微型燃气轮机	蓄电池	安装调试	方案一	方案二	方案三
综合成本/万元	408							
一次性投资成本/万元	17.64	241.5	34.8	106.06	8	390.36	278.43	166.5
运行成本/(万元/年)	0.352 8	4.83	0.696	2.121 2	0.16	7.807 2	8.16	3.33
维护成本/(万元/年)	0.176 4	2.415	0.348	1.060 6	0.08	3.903 6	4.08	1.665
报废成本/万元	-32.64							
经济效益								
电量效益/(万元/年)	2.4	23		12		35	24.7	14.4
可靠性代价								
停电损失/(万元/年)	0.002 4	0.046				0.046	0.024 2	0.002 4
环境效益								
节能减排/(万元/年)	1.173	0.019 5				0.019 5	0.596 3	1.173
经济回报/万元						107.534	14.852	77.652

5 结论与展望

本文以华东地区首个校园微电网示范工程为实例, 提出了多目标评价函数法, 从综合成本、经济效益、可靠性代价和环境效益这四个指标来评判一定时间内的微电网的经济性。研究结果表明在一定的时间内利用分布式新能源可以带来经济上的收益, 而且由于新能源的使用对环境也起到了一定的保护作用。由于本文是研究微电网的经济性优化问题, 因此我们可能就会想到用先进的智能算法, 是不是可以得到更为精确的数据分析? 例如蚁群算法, 首先对微电网区域内的负荷做出预测, 作为已知参数使用, 风力机和光伏出力作为约束条件, 对目标函数做适当的修改; 然后对种群初始化, 将风电和光伏的不同比例关系设定成 n 份, 即 n 只蚂蚁, 对种群进行算法操作, 找到 m 个最小的目标函数并将其输出, 达到设定的迭代次数后, 停止运行。将这些符合约束条件的 m 个目标函数再进行对比, 选出最优的, 即为最经济的方案。

参考文献

- [1] 成思琪, 刘俊勇, 向月, 等. 微网中混储/柴协调运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 42-50. CHENG Siqi, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Research on optimal coordinated operation for microgrid with hybrid energy storage and diesel generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 42-50.
- [2] 孙树娟. 多能源微电网优化配置和经济运行模型研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [3] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 70-79. MENG Jianhui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. Control strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 70-79.
- [4] 田崇翼, 李珂, 张承慧, 等. 基于切换模型的双向 AC-DC 变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 70-76. TIAN Chongyi, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Control strategy for bi-directional AC-DC converter based on switched system model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 70-76.
- [5] 薛美东, 赵波, 张雪松, 等. 基于分布式控制的独立型光储水柴微网调度策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 1-7. XUE Meidong, ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, et al. Economic dispatch of stand-alone photovoltaic-battery-hydro-diesel hybrid microgrid based on distributed control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 1-7.
- [6] HAN H, LIU Y, SUN Y, et al. An improved droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3133-3141.
- [7] WANG Y, CHEN Z, WANG X, et al. An estimator-based distributed voltage-predictive control strategy for AC islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3934-3951.

- [8] 朱旋, 陈得宝, 方振国, 等. 平均成本下垂控制策略在分布式发电中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 14-20.
ZHU Xuan, CHEN Debao, FANG Zhenguo, et al. Mean cost-based droop scheme in the application of distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 14-20.
- [9] 刘喜梅, 赵倩, 姚致清. 基于改进下垂算法的同步逆变器并联控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 103-108.
LIU Ximei, ZHAO Qian, YAO Zhiqing. Research on control strategy of parallel synchronous inverters based on improved droop algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 103-108.
- [10] 邱麟, 许烈, 郑泽东, 等. 微电网运行模式平滑切换的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 171-176.
QIU Lin, XU Lie, ZHENG Zedong, et al. Control method of microgrid seamless switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 171-176.
- [11] 麻常辉, 潘志远, 刘超男, 等. 基于自适应下垂控制的风光储微电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 21-27.
MA Changhui, PAN Zhiyuan, LIU Chaonan, et al. Frequency regulation research of wind-PV-ES hybrid micro-grid system based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 21-27.
- [12] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 25-31.
CHEN Jian, WANG Chengshan, ZHAO Bo, et al. Economic operation optimization of a stand-alone microgrid system considering characteristics of energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 25-31.
- [13] 吴耀文, 马溪原, 孙元章, 等. 微网高渗透率接入后的综合经济效益评估与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 49-54.
WU Yaowen, MA Xiyuan, SUN Yuanzhang, et al. Overall economic evaluation and analysis of accession of microgrids with high penetration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 49-54.
- [14] 言大伟, 韦钢, 胡吟, 等. 可靠性与经济性相协调的微电网能量优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 18-23.
YAN Dawei, WEI Gang, HU Yin, et al. Microgrid energy optimization with coordination of reliability and economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 18-23.
- [15] 田梁玉, 唐忠. 风光储协调控制策略[C] // 2015年全国智能电网用户端能源管理学术年会论文集, 北京, 2015, 7: 65-68.
- [16] 李佳, 刘天琪, 陈亮, 等. 基于理想点法的多准则综合灵敏度电压稳定评估指标[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 108-112.
LI Jia, LIU Tianqi, CHEN Liang, et al. Multi-criterion integrated-sensitivity voltage stability evaluation index based on ideal point method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 108-112.
- [17] 马静, 许冬, 王增平. 基于加权理想点法的配网故障供电恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 61-67.
MA Jing, XU Dong, WANG Zengping. Power restoration strategy based on weighted ideal point method for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 61-67.
- [18] 郑成忠. 多目标半定规划的一类评价函数法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
ZHENG Chengzhong. An estimation function method for multi-objective semi-definite programming[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [19] 刘健康. 极小化极大优化问题的精确解[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LIU Jiankang. Exact solution for minimax optimization problems[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [20] 侯剑, 张立卫. 广义纳什均衡问题求解的极小极大方法[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(6): 924-929.
HOU Jian, ZHANG Liwei. A minimax approach to solving generalized Nash equilibrium problem[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(6): 924-929.
- [21] 郭子雪, 郑玉蒙, 王世超. 模糊线性加权法求解电力系统经济调度问题[J]. 华电技术, 2015, 37(2): 13-15.
GUO Zixue, ZHENG Yumeng, WANG Shichao. Fuzzy linear weighted method to solve the power system economic dispatch problem[J]. Huadian Technology, 2015, 37(2): 13-15.
- [22] 陈朋永, 赵书涛, 乔辰, 等. 模糊几何加权法求解电力系统经济调度问题[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(5): 1-5.
CHEN Pengyong, ZHAO Shutao, QIAO Chen, et al. Fuzzy geometric weighting method for solving economic dispatch in power system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(5): 1-5.

收稿日期: 2015-09-29; 修回日期: 2015-12-20

作者简介:

田梁玉(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网的控制策略和经济性分析; E-mail: 18117408753@163.com

唐忠(1964-), 男, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、微电网控制策略和经济性分析;

焦婷(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网的控制策略。

(编辑 魏小丽)