

独立型风光柴储微电网的电源容量优化与配置

周文君, 刘士荣*, 李金龙, 吴舜裕, 郑凌蔚

(杭州电子科技大学 电气自动化研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为准确配置独立型微电网容量, 针对独立型风光柴储发电系统, 给出一种以供电可靠性为约束, 以系统全寿命周期成本净现值为目标函数的分布式发电单元容量优化方法. 利用 NASA 气象网站的风速和日照辐射资料, 生成单位容量风光电源的年度出力曲线; 根据各分布式电源的寿命和购置运行维护成本, 建立了微电网系统寿命周期内各分布式电源的成本净现值计算模型. 在实例分析中, 针对 2 种不同的负荷曲线, 通过遗传算法求解, 验证了该方法的有效性和正确性.

关键词: 独立微电网; 分布式电源; 电源容量优化; 效益分析

中图分类号: TM61

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 04-0047-06

由于光伏发电、风力发电、海洋能发电等都是不确定的、随机的、间歇性的可再生能源的电源, 发电功率具有随自然条件变化的特点, 属于一类自然变动电源. 将具有这些特征的电源作为独立(孤岛)型微电网的部分电源, 对微电网的电源规划和配置提出了许多新问题, 引起了国内外学术界和工程界的关注, 同时提出了一些具有不同电源种类的容量规划方法.

目前, 围绕具有自然变动电源的独立型微电网的电源容量规划研究成果主要有: 文献[1-2]提出的一种基于日负荷曲线的独立微电网数学模型和优化算法; 文献[3]提出的一种基于全年负载缺电率(LPSP)和全寿命周期成本(LCC)为优化目标的风光储互补发电系统优化设计方法; 文献[4]提出的 4 种电源配置下的微电网优化设计和规划; 文献[5]以孤岛军事微型智能电网提供可靠性保证所需要的存储系统为例, 开发一个分析方法来确定在特定负荷点满足可靠性目标所需要的储能器的数量; 文献[6]提出了利用复合储能技术分别平抑风光联合发电系统的输出功率在不同时段内的波动; 文献[7]采用改进的自适应遗传算法对风-光-沼混合微电网系统进行优化计算; 文献[8]提出了一种基于粒子群优化和遗传算法优化算法的可持续自

治微电网的定址定容的详细方法. 上述方法均存在一定的缺陷: 文献[1-2]采用的负荷仅为日曲线, 无法体现出负荷的季节波动性; 文献[3]仅提出了方法和模型, 没有实例验证; 文献[4]中的 HOMER 软件不具备全局优化能力, 也不具备测试不同的运行策略能力; 文献[5-6]主要考虑短时的供电可靠性, 以瞬态分析为主, 没有考虑系统长期的运行特性; 文献[7-8]中负荷和电源发电计算分别以月份和年为单位, 计算过于粗略, 没法体现出电源出力与负荷之间的匹配度.

笔者研究了独立型风光柴储微电网的电源优化配置, 考虑到风、光电源的间歇性与波动性, 以 NASA 气象数据为依据, 研究了多电源协调运行策略, 在考虑多电源装机与运行维护成本、设备生命周期等条件下, 提出了一种多电源优化模型. 分别以 2 种典型的高校教学楼负荷为例, 研究了在供电可靠性约束条件下的电源容量优化, 并分析了其性能指数. 最后, 通过典型算例分析, 验证了该方法的有效性.

1 分布式电源模型

独立型风光柴储微电网的电源包括光伏电池(组件)、风力发电机、蓄电池和柴油发电机. 笔者

收稿日期: 2014-03-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省科技重大专项(2009C11020); 浙江省自然科学基金(LQ12E07001).

第一作者: 周文君(1986-), 男, 湖南衡阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 分布式能源电力等. E-mail: zhouwenjun2012@foxmail.com

*通信作者: 刘士荣(1952-), 男, 浙江湖州人, 教授, 主要研究方向: 复杂系统建模等. E-mail: liushirong@hdu.edu.cn

考虑的电源容量配置相关模型主要有光伏电池出力模型、风力发电出力模型、蓄电池寿命模型和柴油发电机油耗模型。

1.1 光伏电池出力模型

光伏电池采用美国国家可再生能源实验室(NREL)开发的 HOMER^[9]中模型,其输出功率为:

$$P_p = Y_p f_p \left(\frac{R_T}{R_s} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_s)],$$

式中: P_p 为光伏电池的实际输出功率; Y_p 为光伏电池在标准测试条件下的额定功率; f_p 为损耗系数; R_T 为实际光辐射强度; R_s 为标准测试条件下的光照辐射强度, $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$; α_p 为电池板的功率温度系数; T_c 为实际电池温度; T_s 为标准测试条件 (25°C) 下的电池温度。

1.2 风力发电机出力模型

目前风力发电机输出曲线多采用多段拟合法,计算公式为:

$$P_w(v) = \begin{cases} 0, & v < v_s, \\ a_1 v^2 + b_1 v + c_1, & v_s \leq v < v_1, \\ M, & \\ a_n v^2 + b_n v + c_n, & v_{n-1} \leq v < v_n, \\ 0, & v \geq v_f, \end{cases}$$

式中: $P_w(v)$ 为风速为 v 时风机的输出功率; v 为风机轮毂高度处的风速; v_s 为风机的启动风速; v_f 为风机的切除风速。

1.3 蓄电池寿命模型

蓄电池寿命的计算公式为:

$$R_b = \min(N_b Q_1 / Q_t, R_{bf}),$$

式中: R_b 为蓄电池组寿命, 年; N_b 为蓄电池组中的蓄电池个数; Q_1 为单个蓄电池的寿命周期内电能吞吐量, kWh ; Q_t 为年度蓄电池电能吞吐量, $\text{kWh} \cdot \text{a}^{-1}$; R_{bf} 为蓄电池浮充寿命。

1.4 柴油发电机油耗模型

柴油发电机的燃料消耗量 $C_G (1/h)$ 与其输出功率相关性公式^[10]为:

$$C_G = B_G P_{NG} + A_G P_G,$$

其中: P_{NG} 是额定输出功率; P_G 是实际输出功率; A_G 和 B_G 分别是实际柴油机的燃料曲线消耗相关系数, $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$; 对于大中型柴油机, 推荐设置 $A_G = 0.246 \text{ l} (\text{kWh})^{-1}$, $B_G = 0.081 \text{ l} (\text{kWh})^{-1}$ 。

2 多电源协调运行策略

在风光柴储独立系统中, 风光电源输出不可控。当其功率输出大于负荷时, 由蓄电池吸收部分电能, 不能吸收部分能量废弃; 当风力、光伏发电不能满足负荷时, 蓄电池放电来满足负荷; 若负荷仍有缺口, 启动柴油发电机发电满足负荷并对蓄电池充电, 同时还承担稳定系统电压和频率的任务。

设全年逐时负荷为 $L(t)$, kWh ; t 取 $1 \sim 8760$ 范围内的整数值。设 $E_w(t)$ 、 $E_p(t)$ 分别为单位容量的风机和光伏电池 1 a 中第 t 小时内的发电量, kWh ; $E_D(t)$ 为柴油机年度内逐小时发电量, kWh ; W_w 、 W_p 、 W_D 分别是风机、光伏电池和柴油机的装机容量, kW ; $E_B(t)$ 为蓄电池在 1 a 中 t 时刻的可用剩余容量; W_B 处于充电上限状态下的蓄电池可用容量, kWh 。设 $E_B(0) = W_B$ 。第 t 小时, 系统净负荷 L_n 为:

$$L_n(t) = L(t) - [W_w E_w(t) + W_p E_p(t)].$$

当净负荷为负时, 多余的电能对蓄电池进行充电, 若还有过剩则废弃; 当净负荷为正时, 使用蓄电池放电来满足负荷, 若负荷还有缺口, 则启动柴油发电机平衡负荷。

(1) $E_B(t) \geq L_n(t)$ 时, 柴油机输出能量和蓄电池剩余容量计算公式为:

$$E_D(t) = 0, \\ E_B(t) = \begin{cases} E_B(t-1) - L_n(t), \\ E_B(t-1) - L_n(t) \leq W_B, \\ W_B, \\ E_B(t-1) - L_n(t) > W_B. \end{cases}$$

(2) $W_D(t) < L_n(t)$ 时, 则

(a) $W_D > L_n(t) + W_B - E_B(t-1)$ 时,

$$E_D(t) = L_n(t) + W_B - E_B(t-1), \quad E_B(t) = W_B.$$

(b) $L_n(t) \geq W_D + E_B(t-1)$ 时, 则

$$E_D(t) = W_D, \quad E_B(t) = 0.$$

(c) 其他条件下,

$$E_D(t) = W_D, \quad E_B(t) = E_B(t-1) + W_D - L_n(t).$$

由于未考虑负荷增长及效率衰减等因素, 可用单一年份模拟运行情况来模拟整个生命周期内的系统运行情况。

3 电源成本模型

风力发电机、光伏电池和整个系统设计寿命均

为 25 a, 柴油机寿命为 15 000 h, 其运行维护成本 C_O 以 h 计算。

3.1 风光电源装机与运行维护成本

设单位容量风光电源初始成本为 C_1 , 年度运行维护费用 C_O , 资金折现率 R_D , 考虑电源全寿命年限为 25 a, 则有单位容量风光电源全寿命周期成本 C_L 为:

$$C_L = C_1 + \sum_{i=1}^n C_O / R_D^i.$$

3.2 储能系统装机与运行维护成本

考虑到蓄电池替换和折现率, 25 a 中单位容量蓄电池所需购置次数 n_{pb} 和全寿命周期成本 C_{LB} 计算公式如(1)和(2)式, 其中蓄电池购买次数 $M_b = c(n_{pb})$, $c()$ 表示对括号内的数字取朝正无穷方向靠的最近的整数。

$$n_{pb} = 25 / R_b, \quad (1)$$

$$C_{LB} = C_{IB} \left[\left(\sum_{i=0}^{M-1} \frac{1}{1.06^{c(i \times R_b)}} \right) - \frac{M_b R_b - 25}{R_b 1.06^{M-1}} \right] + \sum_{n=1}^{25} C_O (8\,760 / R_D^n). \quad (2)$$

3.3 柴油发电机装机与运行维护成本

柴油机运行时间 T_d 、柴油机年度发电量 E_{DS} 的计算公式为:

$$T_d(t) = \begin{cases} 1, & E_D(t) > 0, \\ 0, & \text{other}, \end{cases} \quad E_{DS} = \sum_{t=1}^{8\,760} E_D(t).$$

一台柴油机可使用年限 L_D , 所需购置次数 n_{pd} 和全寿命周期成本 C_{LD} 的计算公式为:

$$L_D = 15\,000 / \sum_{t=1}^{8\,760} T_d(t), \quad n_{pd} = 25 / L_D,$$

$$C_{LD} = C_{ID} \left[\left(\sum_{i=0}^{M-1} \frac{1}{1.06^{c(i \times L_D)}} \right) - \frac{15\,000 M_d - 8\,760 \times 25}{15\,000 \times 1.06^{M-1}} \right] + \sum_{n=1}^{25} C_O \times 8\,760 / R_D^n.$$

设定购买次数 $M_b = c(n_{pb})$, 由于燃料价格在不断上升, 假定 25 a 内其上升幅度与折现率一致, 则全寿命周期燃油费用如(3)式, 其中 P_F 为燃油单价, 0.84 为柴油密度。在大容量蓄电池的风光柴储系统中, 柴油机启动后需要满足负荷并给蓄电池充电, 基本保持满负荷运行。大中型柴油发电机满载时折合油耗 $0.208 \text{ kg} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 。

$$C_{LF} = 25 \times 0.208 E_{DS} P_F / 0.84. \quad (3)$$

4 多电源优化模型

根据各部分的费用计算整个系统的净现值计算方法如下:

$$C_{LS} = W_W C_{LW} + W_P C_{LP} + W_B C_{LB} + W_D C_{LD} + C_{LF}, \quad (4)$$

$\min C_{LS}$ 即为优化目标, W_W 、 W_P 、 W_B 、 W_D 为优化变量, 约束条件如(4)式:

$$\begin{cases} E_{SU} \leq E_S \leq E_{SL}, \\ P_c \leq P_{mc}, \\ P_d \leq P_{md}, \\ P_D \geq \min P_D, \\ P_D \leq \max P_D, \\ T_D \geq \min T_D, \\ L_{OLP} \leq \max L_{OLP}. \end{cases} \quad (5)$$

其中: E_{SU} 和 E_{SL} 分别为蓄电池充放电上下限; P_{mc} 和 P_{md} 分别为蓄电池最大充电和放电功率; $\min P_D$ 和 $\max P_D$ 分别为柴油机最小和最大运行功率; $\min T_D$ 为柴油机最小运行时间; $\max L_{OLP}$ 为系统允许的最大负载缺电率^[11]。

5 算法实现

由于分布式可再生能源电源容量优化涉及到非线性规划, 所需数据量大、因数多, 常规数学方法求解困难。笔者选择遗传算法进行求解^[12], 算法实现流程如图 1 所示。

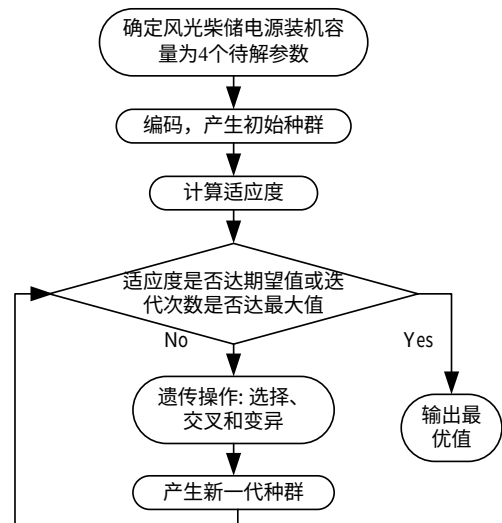


图 1 遗传算法实现流程

初始种群设定为 100, 种群太小易出现早熟收敛现象; 种群太大, 计算时间过长. 初始种群的范围建议设定一个预判区间, 较好的预判区间可大大减少求解的运算时间; 交叉操作可以加快收敛, 一般取 0.75~0.80, 太高也可能导致过早收敛; 变异概率则控制着变异算子的使用频率, 决定了遗传算法的局部搜索能力, 一般取 0.01~0.10 之间.

6 算例分析

微电网多用于海岛或偏远地区, 为了验证上述优化模型, 在海岛(122.20°E, 30.00°N)气象条件下, 对 2 类典型负荷来进行分布式电源容量优化. 负荷类型 1 中不含取暖制冷负载, 负荷类型 2 包括取暖制冷负载. 由于海岛长期用电负荷数据不易获取, 笔者实际使用的负荷数据为某近海高校教学楼负荷数据, 其典型工作日曲线如图 2 和图 3 所示, 各月份分布如图 4 和图 5 所示.

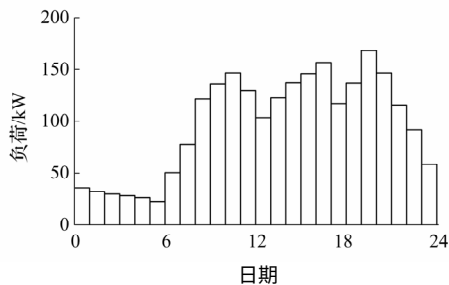


图 2 负荷类型 1 典型工作日分布

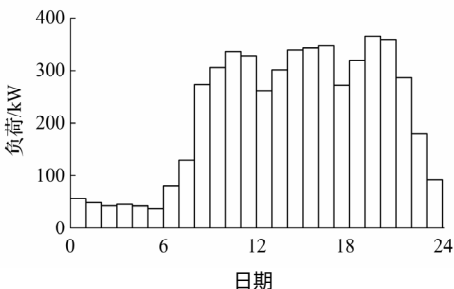


图 3 负荷类型 2 典型工作日分布

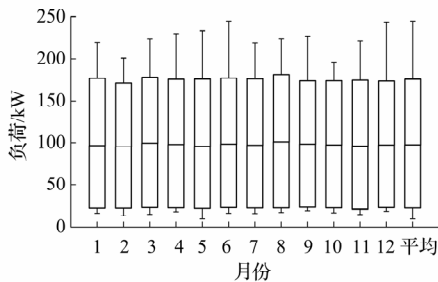


图 4 负荷类型 1 各月分布

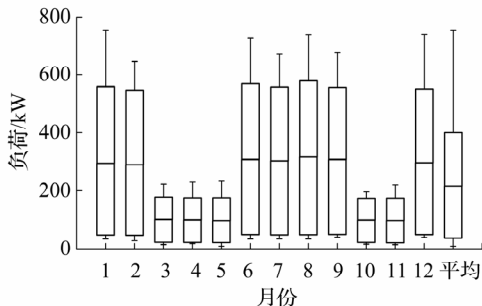


图 5 负荷类型 2 各月分布

气象数据来源于 NASA 数据库^[13], 在该数据库输入地球任意地点的经纬度信息, 即可获取该地点 22 a 的平均气象数据, 如月平均辐射量、月平均风速、月平均温度. 所获取的月平均辐射和风速数据, 经过 HOMER 软件处理, 可以得到全年的逐小时辐射强度和风速. 根据逐时辐射响度数据和风速数据, 即可得到单位容量光伏电池和风机的年度功率曲线.

根据调查, 微电网系统设备投资费见表 1^[14], 其中柴油价格为每升 7.3 元, 蓄电池浮充寿命为 10 a.

表 1 设备投资及维护费用

电源类型	容量	设备费/元	维护费/元	寿命
光伏电池	1 kWp	11 000	235/a	25 a
风机	1 kW	5 000	235/a	25 a
柴油发电机	1 kW	500	15/500 h	15 000 h
蓄电池	2 V/1 000 Ah	2 200	100/a	2 000 kWh

使用风光柴储容量优化模型对负荷类型 1 和负荷类型 2 进行优化. 运行约束为: 蓄电池 SOC 上下限分别为 100%和 65%, 柴油发电机最小运行功率为其额定功率的 30%, 最小运行时间为 1 h, 系统所允许的最大负荷缺电率为 0. 以(5)式为目标函数进行优化, 结果见表 2.

表 2 风光柴储系统容量优化结果

负荷类型	负荷类型 1	负荷类型 2
风光柴储容量/(kW/kW/kW/kWh)	469/264/193/806	1 223/560/644/1 207
系统成本/万元	1 599.97	4 034.90
电价/(元·(kWh) ⁻¹)	1.466	1.665
柴油机运行时间/h	485	550
年废弃电量/MWh	623.813	1 908.474
可再生能源利用率/%	54.925	44.691

为便于比较, 表3给出了在负荷类型1和负荷类型2时光风储系统的最佳配置及其性能参数。

表3 风光储系统容量优化结果

负荷类型	负荷类型1	负荷类型2
风光储容量(kW/kW/kWh)	484/477/2 991	1 500/1 158/9 497
系统成本/万元	2 610.32	7 759.64
电价/(元·(kWh) ⁻¹)	2.385	3.198
年废弃电量/MWh	826.108	2 917.37
可再生能源利用率/%	50.82	39.39

从表2和表3可看出, 在同一负荷下, 风光柴储系统与风光储系统相比, 系统成本降低, 废弃电量减少, 可再生能源利用率有所提高; 当负荷分布不均匀时, 其电价上升的幅度也比风光储系统小。为更好地了解系统的年度运行状况, 图6~图11中给出了2种负荷情况下微电网的年废弃电能、柴油机运行功率和蓄电池剩余电量的时序图。

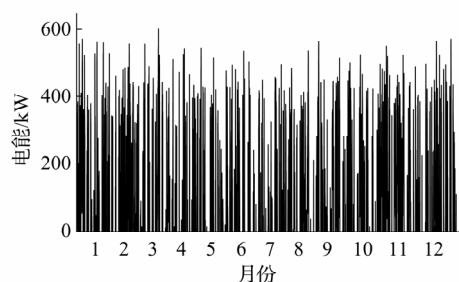


图6 负荷类型1系统年废弃电能

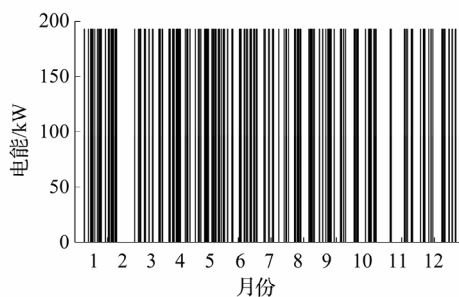


图7 负荷类型1系统柴油机年出力功率

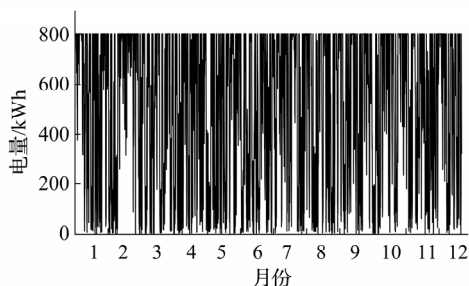


图8 负荷类型1系统蓄电池年剩余电量

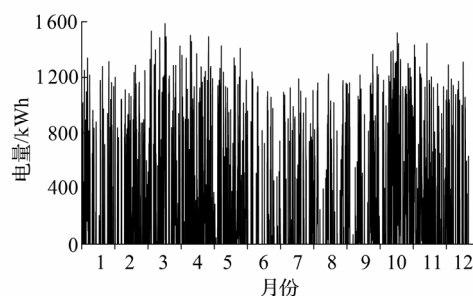


图9 负荷类型2系统年废弃电能

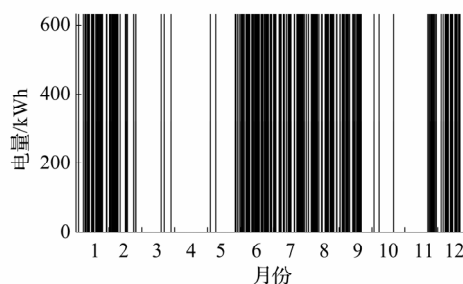


图10 负荷类型2系统柴油机年出力功率

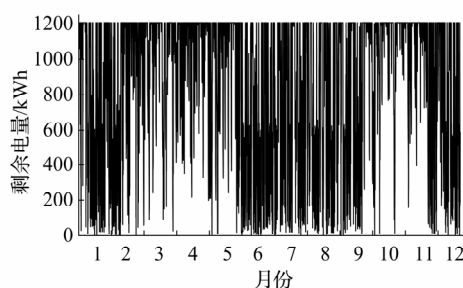


图11 负荷类型2系统蓄电池年剩余电量

从图2~11可以看出, 年度废弃电量分布、柴油运行机时间分布和蓄电池剩余容量的分布与年度负荷分布相关性很强。负荷各月份分布均匀时, 废弃电量分布、柴油运行机时间分布和蓄电池剩余容量分布也比较均匀; 负荷各月份分布差异明显时, 废弃电量分布、柴油运行机时间分布和蓄电池剩余容量分布相差很大。柴油机的出力功率每次都是装机容量额定值, 这是因为系统中的储能容量非常大, 能够允许柴油机每次都满载运行, 这也进一步加强了对柴油燃料的利用, 常规电源的存在, 则大大提高了系统供电的可靠性。

7 结语

通过对独立微电网的容量规划的探讨, 结合从NASA气象网站获取的特定地区的气象资料, 针对典型的风光柴储独立微电网结构, 建立了独

立微电网的容量优化模型,采用遗传算法求解出该非线性规划问题.运用实际案例,证明了该方法的有效性和适用性.以舟山岛的气象资源为例,对2类典型高校教学楼负荷微电网的分布式电源容量进行优化.结果表明,风光柴储系统可再生能源利用率与经济性比风光储有了一定的提高,且可靠性更有保障,因此更适合独立微电网.

参考文献:

- [1] Mizani S, Yazdani A. Design and operation of a remote microgrid[EB/OL]. [2009-09-03]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=5414925>.
- [2] Lee D, Park J, Shin H, et al. Microgrid village design with renewable energy resources and its economic feasibility evaluation[EB/OL]. [2009-10-30]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5356>.
- [3] 李品, 刘永前, 郭伟钊. 离网型风光储互补发电系统优化设计方法研究[J]. 现代电力, 2011, 27(6):51-57.
- [4] Hafez O, Bhattacharya K. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids [J]. Renewable Energy, 2012, 45(6):7-15.
- [5] Mitra J, Vallem M R. Determination of storage required to meet reliability guarantees on island-capable microgrids with intermittent sources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):2360-2367.
- [6] 刘霞, 江全元. 风光储混合系统的协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14):95-100.
- [7] 马艺玮, 杨萃, 郭红霞, 等. 风-光-沼可再生能源分布式发电系统电源规划[J]. 电网技术, 2012, 36(9):9-14.
- [8] Kirthiga M V, Daniel S A, Gurunathan S. A methodology for transforming an existing distribution network into a sustainable autonomous microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1):31-41.
- [9] HOMER 软件[EB/OL]. [2013-03-03]. <http://www.homerenergy.com/>.
- [10] Dufo-Lopez R, Bernal-Agustin J L. Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems[J]. Renewable Energy, 2008, 33(12):2559-2572.
- [11] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003:59-63.
- [12] 雷英杰. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005:257-261.
- [13] NASA 全球气象数据库[EB/OL]. [2013-05-11]. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
- [14] 国网能源研究院. 2013 中国新能源发电分析报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013:11-13.

Power Capacity Optimization and Configuration of Stand-alone Wind/PV/Diesel/Battery Microgrid

ZHOU Wen-jun, LIU Shi-rong*, LI Jin-long, WU Shun-yu, ZHENG Ling-wei

(Institute of Electrical Engineering & Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to configure accurately the capacity of island microgrid, a method of distributed generation unit capacity optimization is given with the constraint of power supply reliability and life cycle cost NPC as the objective function, which aim at constructing the wind-photovoltaic-diesel-storage power generation system. Using the wind speed and sunshine radiation data of NASA's meteorological sites, an annual output curve of unit capacity wind-photovoltaic power supply is obtained, and each distributed generation unit cost NPC in the microgrid system lifetime is calculated according to theirs life and running maintenance costs. In the case analysis, in view of two different kinds of load curves, a genetic algorithm to solve the equation is used, and the proposed method and its practicality are validated.

Key words: island microgrid; distributed generation; power capacity optimization; benefit analysis

(责任编辑 史小丽)