

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.06.014

微电网规划仿真系统开发与应用

郭宝宁¹, 唐平², 丁泉², 黄超²

(1. 江苏海事职业技术学院, 江苏 南京 211170; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

摘要:为解决微电网示范工程的规划设计问题,研究并开发了一套基于 Matlab 的微电网容量规划与运行仿真系统。区别于传统仿真软件的实现方式,该系统可支持微电网多种应用策略下的环境编程,实现原始数据分析、分布式电源容量配置、储能系统规划、系统运行仿真等功能,并具有较高的应用适应性和仿真结果精度。在西藏尼玛微电网项目中的应用结果表明,该微电网规划仿真系统可以模拟微电网实际运行效果,为微电网在前期规划阶段针对分布式电源容量的经济性规划提供有益的参考。

关键词:微电网;容量规划;功率模型;控制策略;经济性评价;仿真系统

中图分类号:TU123 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2019)06-0574-07

Development and application of the microgrid planning simulation system

GUO Baoning¹, TANG Ping², DING Quan², HUANG Chao²

(1. Jiangsu Maritime Vocational Institute, Nanjing 211170, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China)

Abstract: In order to solve the planning and design problems of the microgrid demonstration project, a set of simulation systems for microgrid capacity planning and operation based on Matlab has been developed in this study for the microgrid capacity planning and operation. Different from the traditional implementation of simulation software, the system can support the environment programming of multi-application strategy for the microgrid, and realize the functions of raw data analysis, distributed configuration of power capacity, energy storage system planning, and system operation simulation, etc. It also has high application adaptability and simulation precision. The application result of the Tibet Nyima Microgrid Project shows that the planning simulation system can well simulate the microgrid's actual running effect, and provide useful analysis as well as calculation for the power planning of microgrid in early stage.

Key words : microgrid ; capacity planning ; power model ; control strategy ; economic evaluation ; simulation system

微电网一般由分布式电源、储能装置、能量转换装置、负荷预测与监控装置、保护控制装置汇集而成,是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治发电系统,既可并网运行也可孤岛运行^[1-4]。由于微电网系统的复杂性,导致了项目的投资造价相对较高,特别是分布式电源及配套储能系统的类型、容量对微电网的经济效益和环境效益有着很大的影响,因此针对微电网电源的前期规划对于工程全生命周期具有重要意义^[5-6]。

目前国内外针对微电网的前期规划大多是根据运维需求设计目标函数并选取适当的优化算法进行求解^[7-9]。刘梦璇等^[10]在独立海岛微电网的设计中根据全寿命周期净费用、可再生能源利用率以及污染物排放水平建立多目标函数,采用遗传算法进行优化计算。刘文胜^[11]根据微电网损耗和年发电成本最低建立目

作者简介: 郭宝宁(1964—),女,副教授,主要从事电气自动化技术及相关专业领域研究。E-mail:962440937@qq.com

引用本文: 郭宝宁, 唐平, 丁泉, 等. 微电网规划仿真系统开发与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(6):574-580.

GUO Baoning, TANG Ping, DING Quan, et al. Development and application of the microgrid planning simulation system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(6):574-580.

标函数,通过改进粒子群算法的惯性权重提高算法的收敛速度。以上方法都针对特定应用场景建立了完整的微电网规划模型并通过智能优化算法寻优,但没有形成成熟的软件系统,应用时需进行复杂的建模过程。国外具有代表性的微电网规划通用设计软件有 HOMER^[12] 和 Hybrid2^[13],支持各种分布式电源的仿真和敏感性分析,但匹配的控制策略较少从而限制了系统的应用。HOMER 能对间歇式电源与储能系统进行稳态仿真和优化配置,但无法自动平滑功率输出;Hybrid2 具有强大的仿真功能但不能对系统配置进行优化^[14]。

因此,本文充分考虑了并网微电网与主网间运行控制策略及微网储能系统的控制策略对其运行工况的影响,从工程实用角度出发,计及设备投资成本、运行和维护成本、燃料成本及置换成本,在 Matlab 平台上开发了一套基于不同控制策略的微电网容量规划仿真系统。该系统以供电经济性和环保性为优化目标,可根据项目需求制定针对性的控制策略,并通过引入污染排放、弃风弃光等惩罚成本实现微电网环保性与经济性综合性寻优。

1 系统规划设计流程

1.1 微电网规划仿真

在微电网容量规划中,分布式电源和储能系统的配置是首要考虑的问题。分布式电源可分为微型燃气轮机可控性电源,以及风力发电、太阳能发电等间歇性电源。

微电网规划仿真基本步骤如图 1 所示,规划仿真的主要任务为:根据项目所在地的自然资源(风能、太阳能等)、电/热负荷需求、电网用电成本、设备投资和运行成本,在保证供电可靠性的前提下,确定最优方案中分布式电源与储能系统的种类和容量,并通过仿真给出主要分布式电源的优化运行方案。

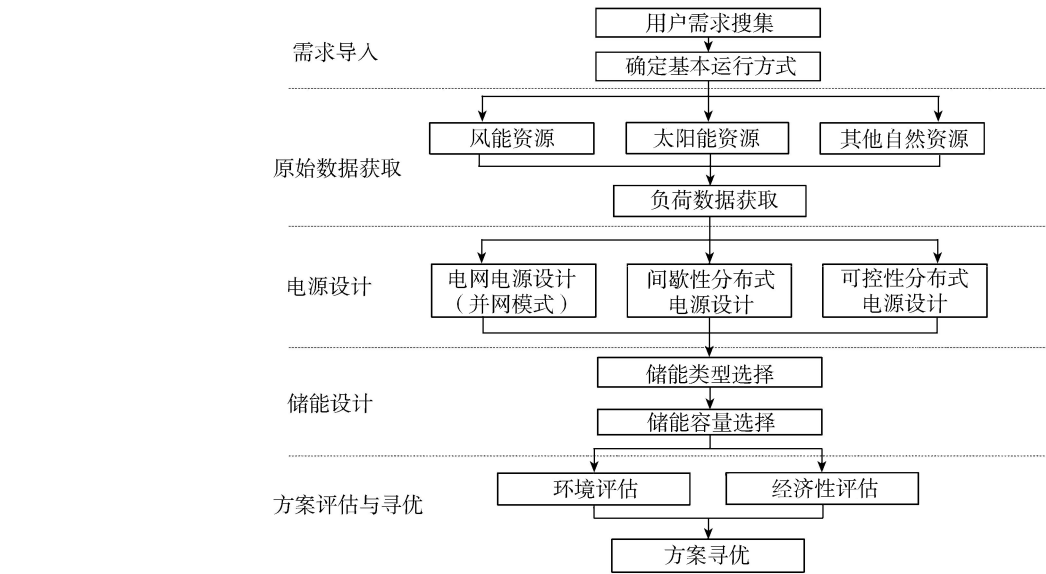


图 1 微电网规划仿真基本步骤

Fig.1 Flow chart of the microgrid planning

1.2 经济性与环境评估

微电网经济评价可综合考虑柴油发电机、蓄电池、风机和光伏等分布式电源的装机容量、价格、寿命以及电网购售电价格和政府补贴等因素,确定工程的初始投资成本、运行成本、设备更换成本及项目建成后的年收益。经济评价主要的指标有成本现值(net present cost, NPC)、投资回报率(return on investment, ROI)、净现值(net present value, NPV)以及投资回报期(payback time, PT)等。

环境评估主要考虑微电网项目在使用柴油、燃气等进行发电时,产生的污染物及二氧化碳排放量。柴油发电机一般用作微电网的备用电源来保证其供电可靠性,但其产生的污染物导致微电网的可靠性与环保性相互制约。本仿真系统将微电网供电可靠性作为约束条件,精确计算二氧化碳和污染物的排放量并将其转化为经济性惩罚成本从而形成综合寻优系统。

2 功率模型

在微电网规划仿真系统开发中,采用了一些较为成熟的功率模型和算法,并在 Matlab 中进行设计与模型搭建。

2.1 光伏发电模型

光伏阵列实际输出功率可由标准额定条件下的输出功率、光照强度、环境温度得到:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{G_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})]$$

式中: P_{PV} ——光伏阵列实际输出功率; f_{PV} ——光伏阵列降额因数; Y_{PV} ——光伏阵列容量; $\bar{G}_T$ ——到达光伏阵列的辐照度; $G_{T,STC}$ ——辐照度标量; α_p ——温度修正系数; T_c ——实际温度; $T_{c,STC}$ ——测试标准温度,为 25℃。模型中假设光伏阵列都装有最大功率跟踪(MPPT)装置。

2.2 风力发电模型

采用双参数 Weibull 分布获得全年风速数据,风机的风速功率曲线为

$$P_{wlg}(v) = \begin{cases} P_r & v_r < v \leq v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v > v_{ci} \\ 0 & v \leq v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \end{cases}$$

式中: $P_{wlg}(v)$ ——风机的风速功率; v_{ci} ——切入风速; v_{co} ——切出风速; v_r ——额定风速; P_r ——风机额定功率。

2.3 储能模型

本文采用的蓄电池仿真模型为当前最常用的 KiBaM 经典电压模型:

充电损耗为

$$L_{chg} = I_c (U_{nom} - U(q, I))$$

放电损耗为

$$L_{dis} = I_d (U_{nom} - U(q, I))$$

式中: U_{nom} ——额定电压; $U(q, I)$ ——当前步长电池电压; I_c ——充电电流; I_d ——放电电流。

2.4 柴油发电机模型

柴油发电机在运行功率范围内,耗油量 F 与其输出功率之间的关系可近似表示为^[15]

$$F = F_0 P_{de-rate} + F_1 P_{de}$$

式中: F ——耗油量, L/h; $P_{de-rate}$ ——柴油机的额定功率, kW; P_{de} ——柴油机的输出功率, kW; F_0 ——柴油发电机燃料曲线的截距系数,即为发电机单位功率的空载耗油量, L/(kW · h); F_1 ——柴油发电机燃料曲线的斜率, L/(kW · h)。

3 控制与优化模型

优化目标的选择和调度控制策略决定了微电网系统的组成以及容量需求,是微电网规划仿真中的 2 个核心问题。

3.1 控制策略

并网微电网与主电网间运行控制策略可分为如下几种:(a) 优先利用微电网内的分布式电源来满足网内负荷需求。允许从主电网吸收功率,但是不允许向主电网输出功率。(b) 微电网内的分布式电源与主电网协同参与系统的运行优化,但仍然是允许从主电网吸收功率,不允许向主电网输出功率。(c) 微电网可以与主电网自由双向交换功率。孤立微电网的运行策略主要考虑微电网内的功率平衡和负荷满足。

微电网储能系统的运行控制策略可以包括以下几种:(a) 储能系统仅维持最低容量需求,作为维持系统稳定、电能质量优化、离并网切换及黑启动等情况下的刚性需求。(b) 当风能和太阳能等间歇性能源本地消纳不掉的情况下,对剩余的电能进行存储,起到削峰填谷的作用。(c) 在一般并网运行模式下,禁止储能系统向电网输出功率,但在电网售电价格足够低的情况下(夜间电网谷底价格区间),可以考虑从电网吸收功

率,用于削峰填谷。

3.2 优化模型

3.2.1 目标函数

成本现值包含所有分布式电源在其生命周期中的初始投资成本、运行维护成本、置换成本,是衡量规划方案经济与否的重要标准,目标函数中再污染气体排放惩罚成本和弃风弃光损失:

$$\min C_{NPC} = \frac{(1 + d)^n - 1}{d(1 + d)^n} (C_{in} + C_{fuel} + C_{om} + C_{grid}) + T_0 + \sum_{i=1}^w \alpha_i V_i \tag{6}$$

式中: C_{NPC} ——成本现值; d ——折现率,取 $d = 6\%$; n ——项目生命周期,取 $n = 20$; C_{in} ——投资折旧成本; C_{fuel} ——燃料成本; C_{om} ——运行维护费用; C_{grid} ——微电网与外网的交互成本; T_0 ——微电网弃风弃光损失,当可再生能源发电功率大于负荷与储能消耗功率,则将该部分剩余电量乘以发电价格即为弃风弃光损失; α_i ——有害气体 i 的单位治理成本; V_i ——有害气体 i 的年排放量; w ——有害气体数; $\sum_{i=1}^w \alpha_i V_i$ ——柴油发电机污染气体排放惩罚成本。

3.2.2 约束条件

a. 电功率平衡:

$$P_{Load} = \sum_{j=1}^m P_{PV,j} + \sum_{j=1}^m P_{WT,j} + \sum_{j=1}^m P_{MT,j} + P_{ES} \tag{7}$$

式中: P_{Load} ——负荷功率; $P_{PV,j}$ ——光伏功率; $P_{WT,j}$ ——风机功率; $P_{MT,j}$ ——燃机功率; P_{ES} ——蓄电池功率容量; m ——电源种类。

b. 蓄电池输入输出功率约束:

$$P_{bat_min} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat_max} \tag{8}$$

式中: P_{bat_min} 、 P_{bat_max} ——蓄电池所允许的最小充电功率和最大放电功率。

c. 分布式电源和储能设备的配置数目以及工作状态约束:

$$\begin{cases} 0 \leq N_{PV} \leq N_{PV,max} \\ 0 \leq N_{WT} \leq N_{WT,max} \\ A_{SOCmin} < A_{SOC} < A_{SOCmax} \end{cases} \tag{9}$$

式中: $N_{PV,max}$ 、 $N_{WT,max}$ ——光伏和风机所预设的最大配置数目,可利用最大负荷功率除以单台光伏和风机额定功率得到; A_{SOC} ——储能的荷电状态。

无论是通过枚举算法还是其他的优化算法均能从不同的角度给出推荐方案,但最终方案的甄选还需要决策者基于自身条件以及项目的实际情况来衡量,因此需要对微电网系统进行仿真模拟,基于实际情况给出优化方案。

4 仿真系统开发

微电网规划仿真系统基于 Matlab/simulink 平台搭建各仿真模块,模拟分布式电源、电网、储能和负荷点间的功率流动,并根据经济和环境参数输入条件,精确计算并评估微电网方案经济性,其仿真系统模型如图 2 所示。

系统模型由 8 个模块构成:风力发电 Wind_System、光伏发电 PV_System、柴油发电 Diesel_Generator、储能系统 ESS_System、电网模块 Grid_System、负荷模、控制模块和优化模块。

仿真过程如下:以某地区的日照资源、风力资源和负荷曲线数据作为输入条件,根据最优解集中的规划内容配置分布式电源容量和经济性参数。求解时采用固定步长模式和离散求解方式,仿真步长设置为 0.0416 s,代表实际运行 1 h,1 s 仿真时间即代表实际运行 1 d。计算后即可观察各分布式电源、负荷以及与电网交换的功率曲线以及经济性指标。

5 仿真系统应用

5.1 项目背景

西藏尼玛县可再生能源局域网工程由华电集团于 2016 年开工建设,该地区太阳能资源丰富,年总辐射

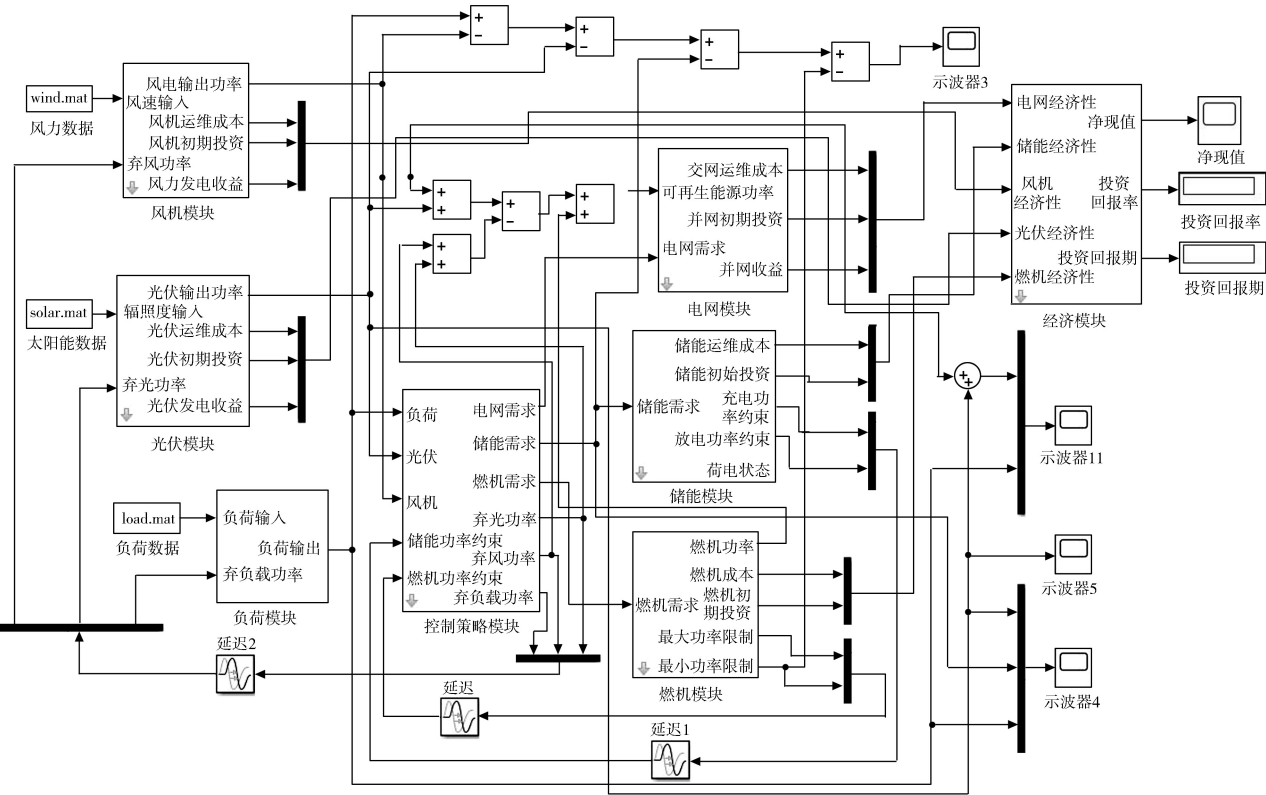


图2 微电网规划设计仿真系统

Fig.2 Simulation model of the microgrid planning

量可达6961.32 MJ/m²,典型日的光照如图3所示。项目以光伏发电作为主要能源供给,结合储能系统、配电系统、柴油机发电等系统构成独立县域微电网。尼玛县负荷需求包括民用负荷与热负荷,其中,民用负荷平均功耗550 kW,峰值约900 kW,热负荷平均功耗550 kW,峰值约1100 kW,热负荷通过电取暖提供,因此可将其折算至电负荷侧。典型日的负荷曲线如图4所示。

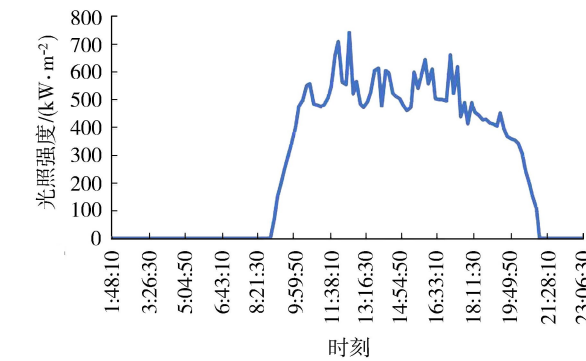


图3 光照强度曲线

Fig.3 Light intensity curve

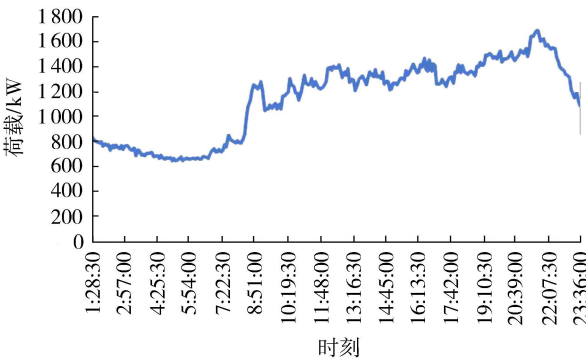


图4 负荷曲线

Fig.4 Load curve

5.2 方案求解

西藏尼玛微电网白天的电能主要来自光伏发电,日落之后电力供应则全部来自储能,柴油发电机组作为其备用电源。为了在供电可靠性和经济性之间寻得最优,需要规划确定光伏和储能的装机容量。其微电网系统仿真基本参数如下:

- a. 光伏系统仿真参数:功率为30 kW,使用寿命为20 a,降额因数为90%,逆变器效率为85%,初建成本为7000元/kW,运行成本为172元/(kW·a⁻¹)。
- b. 柴油发电机仿真参数:功率为1500 kW,使用寿命为20 a,柴油价格为7.32元/L,初建成本为1300元/kW,SO₂治理成本为0.75元/kg,NO_x治理成本为1元/kg,CO₂治理成本为0.002875元/kg。

c. 储能系统仿真参数: 电池容量为 83.4 Ah, 额定电压为 24.0 V, 循环效率为 80%, SOC 取值范围为 0.1~0.9, 最大充/放电电流为 16.7 A、24.3 A, 初建成本为 600 元/(kW·h), 运行成本为 100 元/a。

光伏系统采用多晶硅组件, 容量搜索范围为 3~12 MW, 储能系统使用铅碳电池, 容量搜索范围为 3 MW/15 MW~8 MW/40 MW。通过仿真寻优, 取前 10 个成本现值低的可行性解, 其分布式电源装机容量及成本现值对比结果见表 1。

表 1 可行性解方案对比

Table 1 Comparison of feasibility solutions

可行性解序号	光伏容量/MW	柴油发电机容量/kW	储能容量/(MW·h)	C_{NPC} /万元	可行性解序号	光伏容量/MW	柴油发电机容量/kW	储能容量/(MW·h)	C_{NPC} /万元
1	12	1 500	15	9 342	6	9	1 500	30	8 710
2	11	1 500	15	9 286	7	8	1 500	30	8 921
3	10	1 500	20	8 957	8	7	1 500	35	9 022
4	10	1 500	20	9 056	9	6	1 500	40	9 198
5	9	1 500	25	8 922	10	5	1 500	40	9 286

5.3 仿真结果

通过仿真可得, 最优解的装机方案为光伏装机 9 MW, 储能 P/Q 源装机 6 MW/30 MW·h, 此时电力供应率达到了 99.9%, 且经济性和环保性最优。仿真得到最优解各性能指标如下: 光伏发电量为 18 704 544 (kW·h)/a, 光伏工作时间为 4 383 h/a; 储能总充电量为 3 463 517 (kW·h)/a, 储能总放电量为 2 778 118 (kW·h)/a, 储能寿命为 6.7 a; 负荷供应为 5 274 717 (kW·h)/a, 缺额为 47 903 (kW·h)/a; 初始安装成本为 7 080 万元, 成本现值为 8 710 万元。

从图 5 可看出, 白天主要由光伏给负荷提供电能, 储能吸收储存电量, 同时也改善了光伏发电出力的波动性; 夜晚, 储能补偿了需求功率的低频分量, 供能较多。柴油发电机补偿了需求功率的高频部分, 有助于提高供电可靠性。经仿真计算可知, 该微电网系统全年光伏发电渗透率可达 88.17%。该策略实现了光-储-柴微电网中不同设备响应特性的配合, 充分发挥了不同设备的优势。

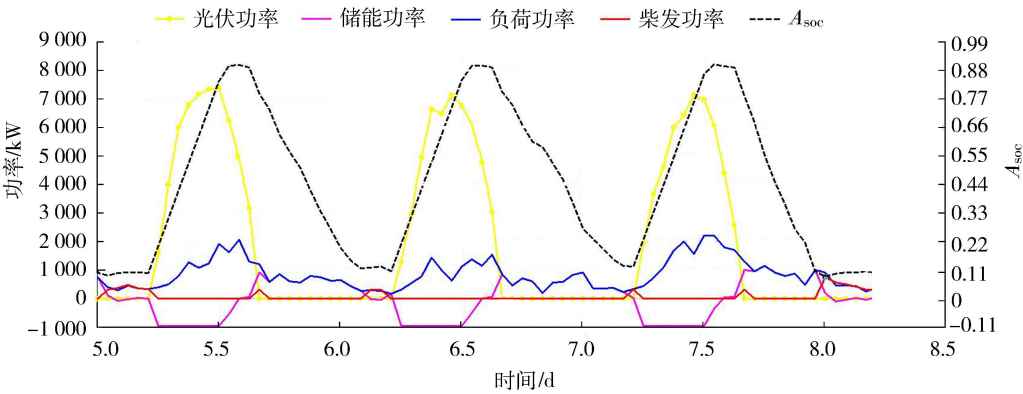


图 5 典型日微电网有功功率

Fig.5 Microgrid active power of typical days

6 结 语

针对微电网工程的分布式电源容量优化配置, 从更加贴近工程实用角度出发, 基于 Matlab 开发了一套微电网规划仿真系统。通过搭建微电网系统主要元件的模型, 计算各类电源和负荷的功率输入、输出, 并把排放目标转化为经济性惩罚成本, 从而将复杂的多目标优化问题转化为单目标方案寻优, 计算微电网分布式电源设计方案的经济性和排放水平。实例计算结果表明, 该方法可以较好的模拟微电网实际运行效果, 并可根据不同工程项目定制开发有针对性的控制策略, 模拟微电网实际运行效果并得到优化的分布式电源容量方案, 为微电网前期规划方案提供有益的参考。

参考文献:

[1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70. (YANG Xinfu, SU Jian, LYU Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(1):57-70. (in Chinese))

[2] MAGRO M C, GIANNETTONI M, PINCETI P, et al. Real time simulator for microgrids[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 160:381-396.

[3] 马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015,39(8):168-175. (MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(8):168-175. (in Chinese))

[4] 冯庆东. 分布式发电及微网相关问题研究[J]. 电测与仪表,2013,50(2):54-59. (FENG Qingdong. A review of the state of the art of distributed generation and micro grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(2):54-59. (in Chinese))

[5] 程启明, 程尹曼, 黄山, 等. 微电网经济优化运行综述[J]. 广东电力, 2018(2):1-9. (CHENG Qiming, CHENG Yinman, HUANG Shan, et al. Summary on economic optimal operation of micro-grid[J]. Guangdong Electric Power, 2018(2):1-9. (in Chinese))

[6] 梁惠施,程林,苏剑. 微网的成本效益分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(增刊1):38-44. (LIANG Huishi, CHENG Lin, SU Jian. Cost benefit analysis for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(Sup1):38-44. (in Chinese))

[7] 赵国波,刘天琪,王春明,等. 基于 NSGA-Ⅱ 算法的分布式电源优化配置[J]. 现代电力,2012,29(1):1-5. (ZHAO Guobo, LIU Tianqi, WANG Chunming, et al. Optimized configuration of distributed generators based on NSGA-Ⅱ algorithm[J]. Modern Electric Power, 2012,29(1):1-5. (in Chinese))

[8] 曾增, 彭春华,王奎,等. 基于鸟群算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13):117-122. (ZENG Ceng, PENG Chunhua, WANG Kui, et al. Multi-objective operation optimization of micro grid based on bird swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13):117-122. (in Chinese))

[9] 周晓燕,刘天琪. 微电网中微电源组合与容量配置优化[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(5):149-155. (ZHOU Xiaoyan, LIU Tianqi. Combination of microsources and optimization capacity configuration in microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013,25(5):149-155. (in Chinese))

[10] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17):39-44. (LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17):39-44. (in Chinese))

[11] 刘文胜. 基于粒子群算法的微电网优化配置与低碳调度[D]. 广州:广东工业大学,2012.

[12] 谭颖, 吕智林, 李苏川. 混合微电网能量优化配置及影响因素灵敏度分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015,40(5):1210-1219. (TAN Ying, LYU Zhilin, LI Suchuan. Hybrid micro-grid energy optimization and sensitivity analysis of influencing factors[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2015,40(5):1210-1219. (in Chinese))

[13] MANWELL J, ROGERS A, HAYMAN G, et al. Hybrid2: a hybrid system simulation model theory manual[R]. Boston: University of Massachusetts, 2006.

[14] 肖峻,白临泉,王成山,等. 微电网规划设计方法与软件[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):149-157,21. (XIAO Jun, BAI Linquan, WANG Chengshan, et al. Method and software for planning and designing of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(25):149-157,21. (in Chinese))

[15] 陈健. 风/光/蓄(柴)微电网优化配置研究[D]. 天津:天津大学, 2014.

(收稿日期:2018-06-21 编辑:张志琴)