

建筑直流供电及蓄电与智能微网整合研究*

王福林¹ 王晓辉² 孟超³ 罗多⁴ 李雨桐⁵ 郝斌⁵

(1. 清华大学室内空气质量评价与控制北京市重点实验室, 北京 100084; 2. 北京建筑大学电信学院, 北京 102616; 3. 厦门大学能源学院, 厦门 361102; 4. 珠海兴业绿色建筑科技有限公司, 珠海 519085; 5. 深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 深圳 518049)

[摘要] 直流供电与交流供电相比, 具有供电效率高、线损少、安全可靠高等优点, 而且方便与光伏发电、蓄电池等直流电源结合, 减少逆变损失和逆变器硬件成本, 实现电力负荷的移峰填谷, 对降低电网装机容量和初投资成本、减少电网低负载运行时间、提高电网效率等具有重要作用, 因此直流供电及蓄电与智能微网整合是建筑供电系统的发展方向。本文讨论了建筑直流供电及蓄电系统的优化设计、优化运行策略、直流供电与交流供电的实验对比、仿真对比, 并在实际建筑中进行了示范应用, 展示了直流供电及蓄电系统的优势。

[关键词] 直流供电; 蓄电; 智能微网; 移峰填谷; 可再生能源; 优化; 仿真

DC power supply and electricity storage in buildings and its integration with smart micro-grid

Wang Fulin¹, Wang Xiaohui², Meng Chao³, Luo Duo⁴, Li Yutong⁵, Hao Bin⁵

(1. Beijing Key Laboratory of Indoor Air Quality Evaluation and Control, Tsinghua University, Beijing, China; 2. School of electricity and Communication, Beijing University of Architecture and Civil Engineering, Beijing, China; 3. School of Energy, Xiamen University, Xiamen, China; 4. Zhuhai Singyes Green Buildings Technology Co. Ltd, Zhuhai, China; 5. Shenzhen Institute of Building Research Co, Ltd., Shenzhen, China)

Abstract: Compared with AC power, the DC power has the advantages of high power supply efficiency, low line loss, high reliability, etc. Further, DC power is more convenient to connect with PV power generation and batteries without needing DC/AC inverter loss and hardware cost. The DC power supply and electricity storage can also achieve electricity demand shift, which can benefit much to the grid by decreasing required capacity and investment cost, reduce the period of partial load operation and so that improve the grid efficient. Therefore, DC power and electricity storage and its integration with smart grid will be development trend of building energy system. This paper discusses the optimal design and optimal operation strategies of the DC power supply and electricity storage in buildings. Experiment and simulation comparison between the DC power supply and AC power supply are conduct. The demonstration of the DC power supply and electricity storage system in a building is introduced as well to prove its advantages.

Keywords: DC power supply, Electricity storage, Smart micro-grid, Demand shift, Renewable energy, Optimization, Simulation

* 国家重点研发计划项目“净零能耗建筑关键技术研究示范”

(项目编号: 2016YFE0102300)

随着中国城镇化的发展，建筑电力消耗在全国总电耗中的占比逐年攀升，2017年北京的建筑总耗电量已经达到城市总电耗的33% [1]。建筑用电的最大问题是存在较大的用电峰谷差，如图1所示，在北京某住宅区实测的用电负荷曲线显示，用电高峰时的耗电量达到用电低谷期的4倍 [2]。巨大的用户峰谷差使得电厂、电网的装机容量较大、初投资增加，而用电低谷期又使得电厂、电网低负载运行，能源利用效率下降。为了解决建筑用电峰谷差问题，研究者提出了大量的解决方案，例如需求侧管理 [3-4]、建筑灵活用能 [5-7]、智能电网 [8]、储能 [9-10]、蓄热 [11-12] 等。

但是这些解决方案的电力负荷移峰填谷能力有限，无法全面消除建筑用电负荷的峰谷差。基于建筑内的用电设备的用电型式逐渐趋向使用直流电、电池技术快速发展、电力电子技术迅速提高的现状，本研究提出直流供电和分布式蓄电的建筑电力系统解决方案，以期能够彻底消除建筑对电网取电的峰谷差、充分消纳可再生能源电力，对城市和社会的可持续发展作出巨大的贡献。下面分别从建筑直流供电和分布式蓄电的系统优化设计、优化运行策略、直流供电与交流供电的仿真对比、实验对比和与智能微网整合的示范应用五个方面进行讨论。

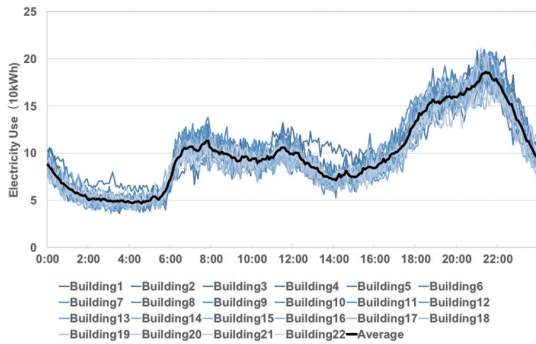


图1 北京某住宅区的实测用电负荷曲线

Fig. 1 Measured electric load curves at a residential community in Beijing

1 建筑直流供电和分布式蓄电的系统优化设计

建筑直流供电和分布式蓄电的系统需要优化的关键参数是蓄电池容量，如果容量选型过小，无法实现彻底消除峰谷差、充分消纳可再生能源的目标；如果容量选型过大，则会增加初投资成本，影响系统的经济性。

本研究提出一种基于全年逐时用电负荷预测的蓄电池容量优化设计方法 [13]，如式 1-4 所示。某案例建筑的蓄电池容量优化设计结果如图 2 所示，通过计算得到全年 365 天的每天所需蓄电池容量，为了降低蓄电池成本，忽略极端天气、考虑一定的不满足率，最终确定最优的蓄电池容量。

$$Q_{rated} \geq \max_d \left(\max_t SOC(d,t) - \min_t SOC(d,t) \right) \quad (1)$$

$$SOC(t) \approx SOC(0) + \eta \int_0^t [P_{set} - P(\xi)] d\xi \quad (2)$$

$$P_{set} = \alpha \frac{\int_0^T P(t) dt}{T} \quad (3)$$

$$P(t) = P_{load}(t) - P_{gen}(t) \quad (4)$$

式中：

Q_{rated} ：蓄电池容量，kWh

$SOC(d,t)$ ：蓄电池在第 d 日 t 时刻的荷电状态，kWh

P_{set} ：建筑从市政电网的取电功率目标值，kW

P_{load} ：建筑的用电负荷功率，kW

P_{gen} ：建筑本地可再生能源发电功率，kW

$P(t)$ ：建筑在 t 时刻的净用电负载功率，kW

T：蓄电池充放电循环周期，小时

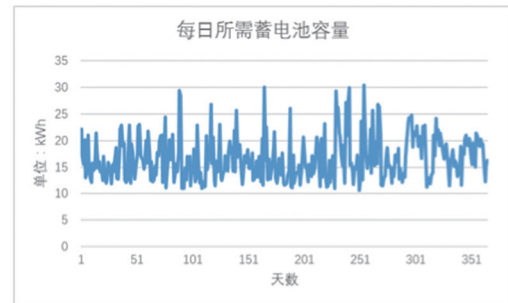


图2 某案例建筑的蓄电池容量优化设计结果

Fig. 2 Optimal design results of battery capacities of a case study building

2 建筑直流供电和分布式蓄电的优化运行策略

建筑直流供电和分布式蓄电的运行策略可以分为下述三类：

(1) 市政电网恒功率取电模式，即建筑从市政电网的取电功率相同，不随时间变化，彻底消除用电的峰谷差。这种运行模式需要通过蓄电池充放电来弥补取电

功率和用电负载功率之差，用电负载功率大于电网取电功率时蓄电池放电，反之蓄电池充电。

(2) 需求响应模式，即建筑电力系统响应市政电网的用电指令，当建筑用电负载功率大于电网用电限值时，蓄电池放电补充电网供电不足的部分。当用电负载较小时，给蓄电池充电，以备放电所需电量。

(3) 最小电费模式，即建筑电力系统根据当地电力分时电价，在电价低谷阶段从电网取电蓄存在蓄电池中、在电价高峰阶段不从电网取电而从蓄电池放电，实现一天累计电费最小的运行模式。该运行模式需要求解电费最小的优化问题，得到最优的充放电运行策略，动态规划法是求解该类优化问题的有效方法^[14]。图 3 显示了某案例建筑在某典型日不同运行策略下用电功率的逐时曲线，图中对比了无蓄电池、恒功率取电、最小电费三种模式的逐时用电功率的曲线，该典型日恒功率取电模式可以比无蓄电池情景节约电费 56%、最小电费模式可以比无蓄电池情景节约电费 84%。

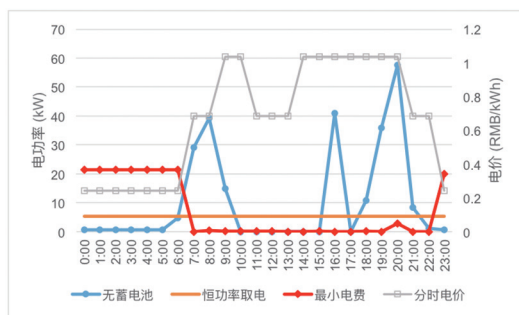


图 3 某案例建筑的典型日三种运行策略的用电功率曲线
Fig. 3 Gird power use curve of three different operation strategies at a typical day of the case study buildings

3 直流供电与交流供电的仿真对比研究

研究对象的直流微电网系统由分布式电源、储能装置、换流装置、逆变器、控制模块以及负载组成，拓扑结构如图 4 所示。双母线结构采用了正、负两级母线的双极性供电制式。基于 Matlab/Simulink 仿真平台，建立了双极母线结构的直流微电网系统仿真模型如图 5 所示。

基于所搭建的仿真模型，分别针对直流微电网的单双母线结构进行了对比研究。首先从拓扑结构上分析了两者的区别，然后以控制电压的方式等效实现了双极母线的结构。应用相同的光伏电池，输入相同程度的光

照强度与温度，使用相同的储能模块以及相同参数的负载，仅设置系统拓扑结构不同，对它们的运行特性进行了仿真分析。在双极母线结构的直流微电网系统上，使用直流线损率的计算模型针对母线两处的线路损耗进行了计算和对比，发现一般直流微电网系统的母线长度在 1km 左右的线损率不会超过 0.1%，母线长度 2km 的线损率不会超过 0.2%，单级母线电压在 375-400V 之间的线损率差别较小，储能装置的加入不会对线损率有大的影响。

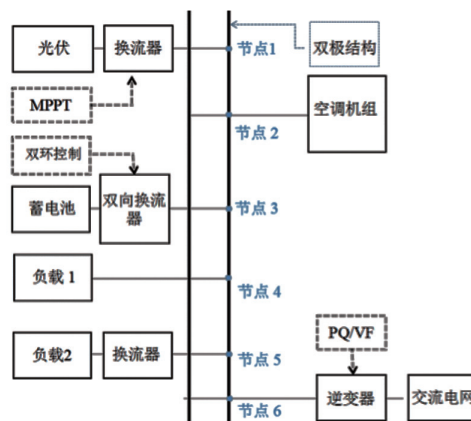


图 4 直流微电网结构图
Fig. 4 Topology of the DC micro-grid

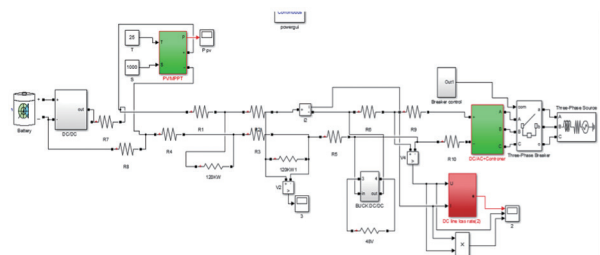


图 5 直流微电网系统仿真模型
Fig. 5 Simulation model of the DC micro-grid

4 直流供电与交流供电的实验对比研究

通过开展交流供电、直流供电、交直流混和供电的实验对比研究，分析全直流供电建筑技术对净零能耗建筑的贡献程度。所开发直交流混合微电网系统，包括光伏发电单元、市电网、储能单元、新型交流不间断变换器、电容单元、直流负载、交流负载和监控单元等，如图 6 所示。光伏发电单元通过单向 DC/DC 变换器连接至直流母线，市电网通过双向 AC/DC 变换器连接

至直流母线，储能单元通过双向 DC/DC 变换器连接至直流母线，直流负载通过单向 DC/DC 变换器连接至直流母线，交流不间断变换器输入端连接至直流母线和市电网，输出端连接交流负载，电容单元连接至直流母线；监控单元通信连接双向 AC/DC 变换器，实现上级电网对微电网的调度，通过所交流不间断变换器维持交流负载长时间不间断运行。以台式机电脑为例，展示用电负载的交直流对比实验结果，如图 7 所示，满负荷工况下，台式机电脑 DC 供电的情况下用电功率比 AC 供电时低 7%，耗电量低 11%。

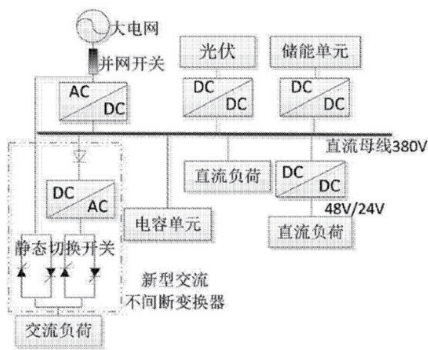


图 6 直流混合微电网系统

Fig.6 The micro-grid system of the DC-AC hybrid micro-grid

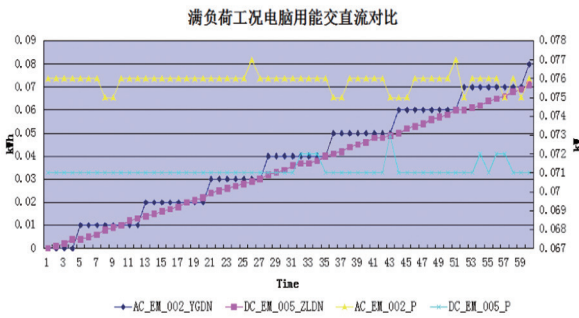


图 7 台式机电脑交直流供电对比实验结果

Fig. 7 Experimental comparison results of the power consumption of desktop computer supplied with AC and DC power

5 建筑直流供电和分布式蓄电系统与智能微电网整合的示范应用

建筑直流供电和分布式蓄电系统与智能微电网整合的示范于中美低碳建筑与社区实验中心项目实施，总建



图 8 示范建筑效果图

Fig. 8 Image photo of the demonstration building

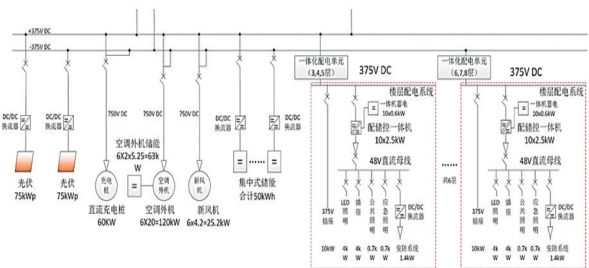


图 9 示范建筑直流供电系统拓扑图

Fig.9 Topology of the DC power system of the demonstration building

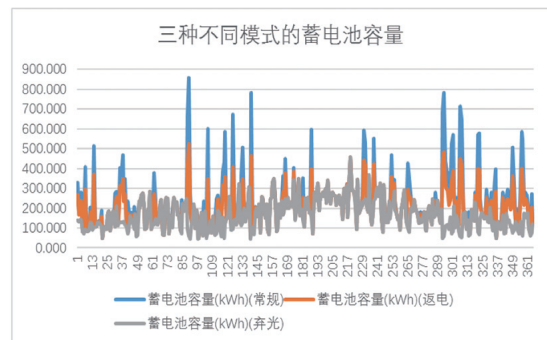


图 10 示范建筑蓄电池容量的优化设计

Fig. 10 Optimal design results of the battery capacity of the demonstration building

筑面积 62874.09 平方米，项目效果图如图 8 所示。其中圆圈所指示的模块，用于建筑直流供电和分布式蓄电系统与智能微电网整合的示范，建筑面积约 5000 平方

米。示范建筑的直流供电和分布式蓄电系统的拓扑图如图 9 所示。对示范建筑的蓄电池容量进行优化设计的结果如图 10 所示。放弃一些极端天气, 当不满足日数为 20 天, 即全年的 5% 时, 蓄电池容量为 289.8kWh, 约为 58Wh/m² 建筑面积。基于该蓄电池容量, 对比了不同运行策略的电费, 结果如图 11 所示, 与无蓄电池方案相比, 恒功率取电模式和经济最优模式的全年运行电费分别减少 43% 和 57%。

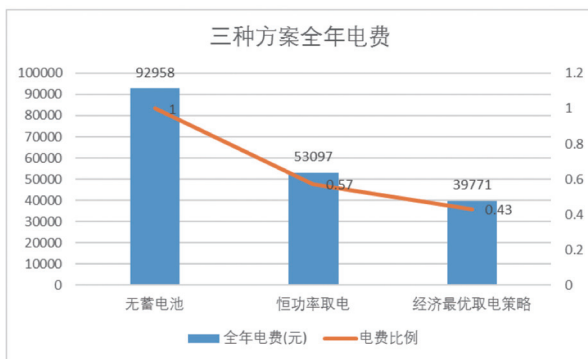


图 11 示范建筑不同运行策略的电费对比

Fig. 11 Electricity cost comparison of different operation strategies of the demonstration building

6 结论

本文提出了建筑直流供电及蓄电系统的设计优化和运行策略优化的方法, 通过仿真和实验对比了直流供电与交流供电的能效差异, 并对示范建筑的直流供电及蓄电系统进行了优化设计和运行策略优化, 得到以下结论:

(1) 通过蓄电池容量的优化设计, 可以实现建筑用电负载的移峰填谷, 彻底消除用电峰谷差。

(2) 通过直流供电及蓄电系统运行策略的优化设计, 可以降低建筑用电电费超过 50%。

(3) 直流供电与交流供电的仿真及实验对比发现, 用电设备在直流供电时可节省耗电量 10% 左右。

参考文献

[1] 北京统计局. 北京统计年鉴 2018. 北京: 中国统计出版社.

[2] 周恩永, 城镇居民用电模型方法研究, 清华大学毕业论文, 2015.

[3] Gelazanskas L., & Gamage K.A.A. Demand side management in smart grid: A review and proposals for future direction, *Sustainable Cities and Society*, 2014, 11: 22-30.

[4] Gellings, C. W., & Chamberlin, J. Demand side management: Concepts and methods. Lilburn: The Fairmont Press Inc., 1988.

[5] Jensen S. Ø., Marszal-Pomianowska A., Lollini R., et al. (2017). IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings, *Energy and Buildings*, 155: 25-34.

[6] Niu J., Tian Z., Lu Y., et al. (2019). Flexible dispatch of a building energy system using building thermal storage and battery energy storage, *Applied Energy*, 243: 274-287.

[7] D' Ettore F., Rosa M. D., Conti P., et al. (Mapping the energy flexibility potential of single buildings equipped with optimally-controlled heat pump, gas boilers and thermal storage, *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50:101689.

[8] European Commission. European smart grids technology platform: Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. EUR 22040, 2006.

[9] Pero C. D., Aste N., Paksoy H., et al. (2018). Energy storage key performance indicators for building application, *Sustainable Cities and Society*, 40: 54-65.

[10] Zame K. K., Brehm C., Nitica A. T., et al. (2018). Smart grid and energy storage: Policy recommendations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(1): 1646-1654.

[11] Kuznik F., Johannes K., Obrecht C., et al. A review on recent developments in physisorption thermal energy storage for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 576-586.

[12] Rathore K. P. S., Shukla S. K. Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review, *Construction and Building Materials*, 2019, 225:723-744.

[13] 李奥, 王福林. 建筑直流供电和蓄电系统蓄电池容量优化设计 [J]. *建筑电气*, 2017, 36(04):12-17.

[14] Ruiting Wang, Fulin Wang, Bin Hao, Yutong Li, Wei Feng. Optimization of Charging/discharging Strategy of Distributed Battery Storage in Buildings Using Dynamic Programming, *The 11th International Conference on Applied Energy, ICAE 2019*, 12-15 August, Vasteras, Sweden.