

Application Research of Distributed Energy System Based on Gas and Solar Energy and GSHP

Fuxing Wang¹, Zhengang Xue^{2*}, Yan Wei², Guohong Li², Aonan Wang²

¹Tianjin Petrochemical Company, Tianjin

²North China Electric Power University, Baoding Hebei

Email: *18832280053@163.com

Received: Jan. 13th, 2019; accepted: Feb. 7th, 2019; published: Feb. 14th, 2019

Abstract

By using the DeST software, this paper simulates a centralized apartment with a nearby general hospital in Zhengzhou, obtains an hourly load data of cooling and heating power load. According to the data, a distributed energy system is set up, and the micro-gas turbine generator set is taken as the main equipment, supplemented by the solar collector system, and then coupled with the ground source heat pump to form a multi-energy complementary distributed energy system. The detailed analysis of the system's energy saving, environmental protection and technical economy shows that the distributed energy system has higher energy efficiency, good environmental benefits and economic feasibility than conventional systems.

Keywords

Multi-Energy Complementation, Distributed Energy, Energy Simulation, Performance Evaluation

基于燃气与太阳能及地源热泵的分布式能源系统应用研究

王富兴¹, 薛正昂^{2*}, 魏言², 栗国鸿², 王傲男²

¹天津石油化工公司, 天津

²华北电力大学, 河北 保定

Email: *18832280053@163.com

收稿日期: 2019年1月13日; 录用日期: 2019年2月7日; 发布日期: 2019年2月14日

*通讯作者。

文章引用: 王富兴, 薛正昂, 魏言, 栗国鸿, 王傲男. 基于燃气与太阳能及地源热泵的分布式能源系统应用研究[J]. 电力与能源进展, 2019, 7(1): 1-10. DOI: 10.12677/aepe.2019.71001

摘要

利用DeST软件对郑州市某集中公寓小区及附近某综合医院进行了模拟,得到了详细的冷热电逐时负荷数据。从而进行了分布式能源系统的搭建,确定了以微型燃气轮机发电机组为主要设备,辅以太阳能集热系统,再与地源热泵耦合形成多能互补分布式能源系统。并对该系统的节能性、环保性以及技术经济性进行详细的分析,得出此分布式能源系统具有比常规系统更高的能源利用效率和良好的环保效益以及经济可行性。

关键词

多能互补, 分布式能源, 能耗模拟, 性能评价

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

分布式能源系统作为一种可以有效解决能源环境问题的能源利用形式,逐渐成为各国未来能源发展的重要方向[1] [2] [3]。美国的分布式能源系统中以天然气热电联供为主,截止到2016年,美国已成功建设了6000多座分布式能源系统[4];德国绝大多数的可再生能源是以分布式能源的形式利用,计划在2020年将分布式能源的发电量占比提高到25% [5];丹麦已有70%以上的建筑实现了分布式能源集中供热技术[6],其中可再生能源在总的热力供应中占比达到了45%,超过了天然气和煤炭[7]。我国分布式能源起步较晚,进入21世纪后我国逐渐开始建设真正意义上的分布式能源项目。我国较为典型的分布式能源项目有上海黄埔中心医院、上海虹桥CBD能源中心、上海浦东国际机场、广州大学城分布式能源站等[8] [9] [10] [11] [12]。

分布式能源系统常用的发电方式有微型燃气轮机发电、风能发电、太阳能光伏发电、燃料电池发电等[13]-[20]。巢青等[16]对APU和微型燃气轮机发电机主要部件的关键技术进行了探讨分析;沈鑫等[18]分析了微型燃气轮机系统孤网带负荷时的动态特性;海涛等[19]设计了一种可变拓扑结构的太阳能光伏发电系统;Asumadusarkodie S等[20]对加纳的太阳能光伏发电的潜力和经济可行性进行了分析;韩中合[21]等对武汉市某工业园区进行了分布式能源系统搭建,并针对不同的系统采用熵权法-灰色关联分析进行了3E综合评价。本案例采用微型燃气轮机为主要设备,辅以太阳能集热系统,并针对“煤改气”推行中供气不足的现象,为保证系统稳定再与地源热泵耦合形成多能互补分布式能源系统,经分析具有较高的能源利用效率和良好的环保效益以及经济可行性。

2. 模型构建及模拟分析

2.1. 模型构建

以郑州某集成公寓小区建筑及附近某综合医院为研究对象,结合当地环境因素对其全年冷热电负荷进行模拟分析。集成公寓小区总建筑面积约为35,000 m²,实际使用面积为33,680 m²,其典型公寓楼模型构建如图1(a)所示。郑州某医院为三级综合性医院,总用地面积为62,144 m²,总建筑面积为155,197 m²,

其建筑模型构建如图 1(b)所示。

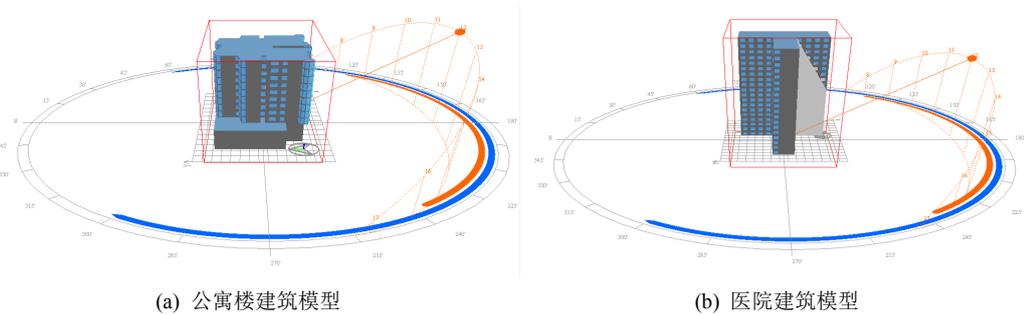


Figure 1. Apartment building model and hospital building model
图 1. 公寓楼建筑模型以及医院建筑模型

在 DeST 软件中对搭建的建筑进行围护结构参数设定, 公寓楼建筑以及医院建筑参数如表 1 所示。根据城镇居民生活作息以及医院作息特点设定各房间人员和设备热扰以及空调等电器设备启停时间。根据《郑州市城市供热与用热管理办法》结合 DeST 软件气象库, 设定公寓楼及医院具体供暖季、制冷季以及过渡季时间分布, 如表 2 所示。

Table 1. Apartment building and hospital building parameters
表 1. 公寓楼建筑以及医院建筑参数

项目	公寓楼建筑参数字数	医院建筑参数
外墙传热系数(W/m ² ·K)	0.977	0.78
外窗传热系数(W/m ² ·K)	2.900	5.94
屋顶传热系数(W/m ² ·K)	0.812	0.73
设备功率密度(W/m ²)	28	60
照明功率密度(W/m ²)	7	15
人员密度(人/m ²)	0.02	—
供暖季室内温度(°C)	18~22	18~22
供冷季室内温度(°C)	25~27	25~27

Table 2. Time distribution of heating, cooling and transition seasons for apartment buildings and hospitals
表 2. 公寓楼和医院供暖季、制冷季及过渡季时间分布

(a) 公寓楼供暖季、制冷季及过渡季时间分布			
季节	时间分布	负荷情况	总小时数
供暖季	1月1日~3月15日	全日供暖	2880 h
	11月15日~12月31日		
制冷季	5月15日~9月30日	间断制冷	3312 h
过渡季	3月16日~5月14日		2136 h
	10月1日~11月14日		
(b) 医院供暖季、制冷季及过渡季时间分布			
季节	时间分布	负荷情况	总小时数
供暖季	1月1日~3月30日	全日供暖	3984 h
	10月15日~12月31日		
制冷季	5月15日~9月30日	间断制冷	3312 h
过渡季	3月31日~5月14日		2160 h
	10月1日~11月14日		

2.2. 模拟分析

清华大学自 1980 年开始开发了具有完全自主知识产权的建筑能耗模拟软件 DeST，目的为了帮助设计者在整个设计过程中完成复杂的计算，预测设计方案在运行时的效果和能耗，并揭示有可能出现的方案而从实现设计方案的节能与舒适。迄今为止，DeST 已经应用于很多大型、具有复杂集合体的建筑节能的分析之中，如国家大剧院、北京 T3 航站楼、水立方以及国家主体育馆鸟巢等。

通过 DeST 软件模拟计算后，得出公寓建筑和医院主楼各类能耗数据，通过对得到的数据进行详细的分析处理，即可确定分布式能源系统的主要设备的容量配置，并进一步确定系统的配置方案和运行策略优化方案。DeST 软件的模拟计算结果及分析如下。

图 2(a)为全年逐时冷热负荷分布图，从中可以看出全年用户热负荷最高的月份为 1 月份，达到了 1665.15 MWh。这是因为 1 月份的平均环境温度最低，导致用户的用热负荷明显增加，随着平均温度的逐渐增大，热负荷也越来越小。同时因为 7 月份的平均温度最高，所以其用户的制冷负荷也最高为 1138.63 MWh，同样随着平均温度的逐渐降低，冷负荷也越来越小。但由于医院洗衣房等特殊部门的存在，其始终存在一定量的热负荷需求。

图 2(b)为全年逐时电负荷分布情况，从图中能够看出其分布成周期性变化，电负荷峰谷大小基本相同，其峰值在 1200 kWh 左右波动。

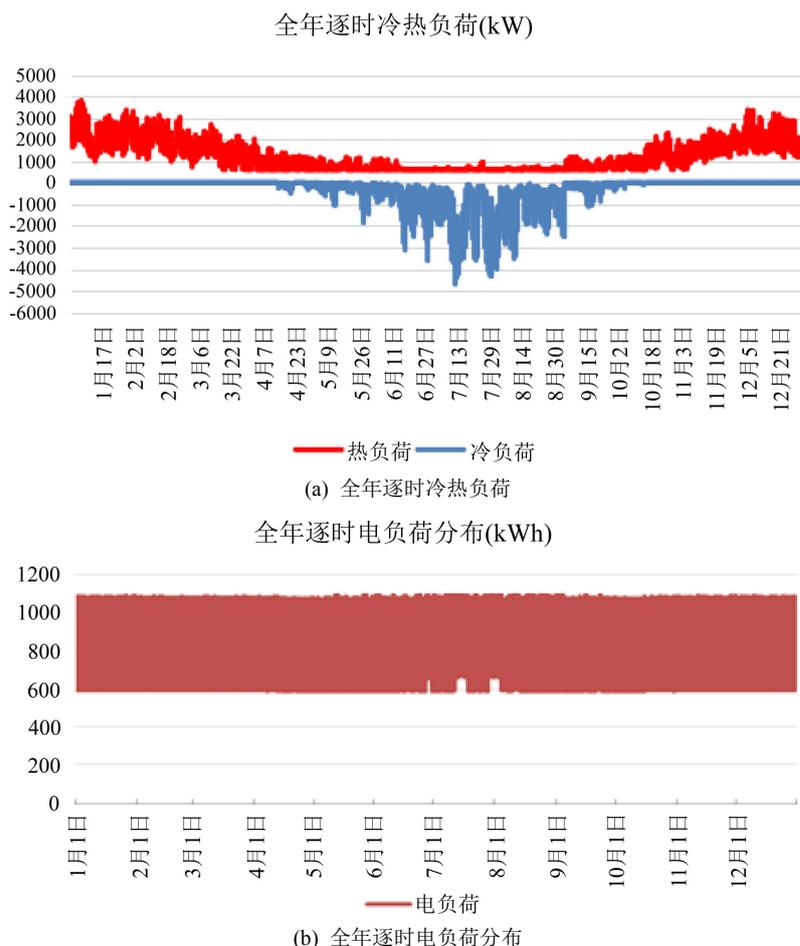


Figure 2. Overall annual simulation results

图 2. 全年总体模拟结果

图 3 为全年热电比分布曲线图，从中能够看出，有 70%左右的时间热电比大于 1，有 40%左右的时间热电比大于 2；其最高达到了 6.5 以上。

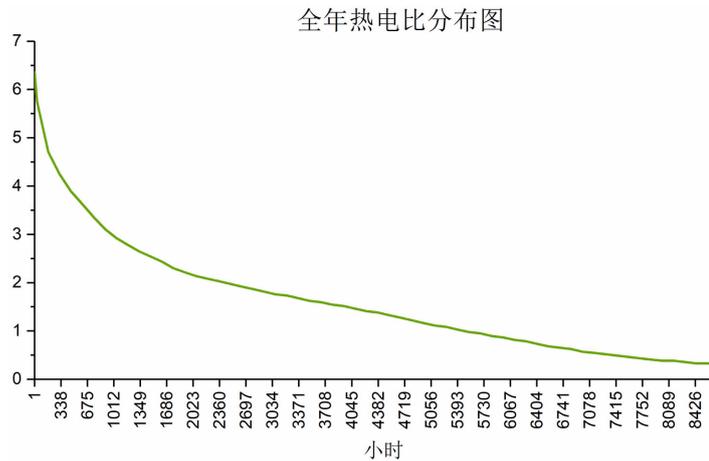


Figure 3. Annual thermoelectric ratio distribution

图 3. 全年热电比分布

3. 分布式能源系统配置方案

3.1. 分布式能源系统主要设备选型方案及系统构成

通过建筑物能耗模拟计算得到的能耗数据以及图 2 所示的全年逐时冷热电负荷分布，可以分析得到分布式能源系统主要设备的具体技术参数。如表 3 所示。

Table 3. Design load statistics of distributed energy systems

表 3. 分布式能源系统各项设计负荷统计值

负荷类型	统计值
最大设计电负荷(kW)	1100
平均设计电负荷(kW)	880
最大设计热负荷(kW)	3790
平均设计热负荷(kW)	1040
最大设计冷负荷(kW)	4520
平均设计冷负荷(kW)	665

目前楼宇型分布式能源系统采用的主要发电设备一般以小型燃气轮机、微燃机和燃气内燃机较多。根据表 3 中的负荷统计，本案例的电负荷偏小，所以合适的主要发电设备为微燃机和燃气内燃机两种。根据图 3 全年热电比分布曲线，可以看出，该案例热电比较高，适合采用热电比较高的微燃机作为系统的主要设备，再辅以余热锅炉、溴化锂制冷机组、电制冷机组以及太阳能集热器等设备。此外，由于天然气供应的问题日益严峻，为保障系统正常运行，耦合地源热泵系统以提高整个系统的稳定性是很有必要的。

本项目选择的是英国 Bowman 公司生产的可以调节供热量的 TG80BG 微燃机组，该型号机组可以模块化组合使用，能够将 8 台 TG80BG 机组组合成一个发电负荷为 80~640 kW，供热负荷为 150~2034 kW 的柔性系统，适应性强。其供热能力相当于一台 1200 kW 的小型燃气轮机，发电能力相当于一台 650 kW 的燃气轮机，但其发电效率却要比 650 kW 的机组高，可达 28%以上。分布式能源系统主要设备选型方

按照“以热定电”的原则，当天然气供应充足时，首先保证地源热泵进行供冷供热，然后由微燃机组进行补充，而燃气锅炉作为调峰设备补足用户的峰值负荷。当天然气供应不足但未停止时，燃气锅炉首先停运，微燃机变负荷运行，不足的热负荷由市政供热进行补充。当天然气供应完全停止时，微燃机以及燃气锅炉停运，此时地源热泵系统和太阳能集热系统无法满足用户的热负荷需求，此时，由市政供热进行补充，以确保用户负荷的稳定供应。而在这些不同的运行工况下，用户的电负荷需求，由电网作为补充，确保电负荷的稳定。

4. 分布式能源系统性能分析

4.1. 分布式系统与常规系统的能耗分析

通过能耗数据进行分析计算，结合系统设计方案，可确定分别采用分布式能源系统与常规系统时的建筑能耗参数，如表 5 所示。从表 5 中可以看出，分布式能源系统方案中，用户绝大部分冷热电负荷均由系统余热供给，而常规系统电负荷全部来自电网，冷负荷全部采用电制冷，热负荷由燃气锅炉提供。由于用户生活热水以及医院洗衣房等热负荷常年稳定存在，因此，年热负荷需求明显超过年冷负荷需求。

分布式能源系统的各项性能指标计算公式如下：

年平均能源综合利用率：

$$\eta = \frac{3.6W + Q_1 + Q_2}{BQ_L} \times 100\%$$

一次能源综合利用效率：

$$PER_{CCHP} = \frac{Q_H + Q_C + Q_E}{Q_L} \times 100\%$$

一次能源节约率：

$$\Delta q_p = \left(1 - \frac{PER_{CCHP}}{PER_{SG}} \right) \times 100\%$$

根据表 5 的数据以及上述公式可以得到年平均能源综合利用率、一次能源综合利用效率以及一次能源节约率分别为 78%、93.6%以及 22.3%。

Table 5. Energy analysis of distributed energy system and conventional system

表 5. 分布式能源系统与常规系统的能耗分析

项目	单位	分布式能源系统	常规系统
年发电量	万 kWh	358.32	/
年供热 量	余热供热量	755.36	
	太阳能供热量	91.01	
	地源热泵供热量	183.34	1060.96 (燃气锅炉)
	锅炉供热量	31.24	
年供冷 量	余热供冷量	135.77	
	电制冷量	47.85	286.46 (电制冷)
微燃机年耗气量	万 m ³	170.51	/
年总耗气量	万 m ³	176.31	120.29
年系统耗电量	万 kWh	121.35	155.82 (制冷电耗)
用户年总耗电量	万 kWh	769.07	924.89 (电网)

4.2. 系统技术经济性分析

1) 项目投资估算

根据分布式能源系统主要设备设计选型方案以及相关设备资料,可以估算出整个项目的总投资情况,总投资包括工程费用以及工程建设其他费用。工程费用主要包括土建工程、热力系统工程、室内给排水改造工程、循环水工程、变配电工程、采暖通风系统工程;工程建设其他费用主要包括系统主要设备及配套电气、暖通等附属设备的采购、安装和设计费等。

目前郑州市非居民燃气费、电价、热价以及冷价为天然气 1.91 元/m³;供电价格 0.86 元/kWh;供热价格 28 元/m²;供冷价格 22 元/m²。由此,根据技术经济性评价指标,可计算出本项目的各项年收入、年利润以及动态投资回收期等财务数据,见表 6。

根据表 6 中数据,对本案例的财务盈利能力进行分析,计算案例投资内部收益率的大小,对比当前我国分布式能源系统项目的参考基准收益率进行对比,确定本案例的盈利能力。本文中采用的参考基准收益率为 15%进行计算。经过计算,本项目动态投资回收期为 5.4 年,项目投资的净现值为 2727.81 万元,项目内部收益率为 20.62%,因此该项目盈利能力良好,在经济上是可行的。

Table 6. Main technical and economic evaluation indicators of the project
表 6. 项目主要技术经济性评价指标

序号	项目	单位	数额
1	总投资	万元	1983.43
2	建设投资	万元	1721.05
3	自有资金比例	%	30
4	银行贷款比例	%	70
5	银行利息	%	7.05
6	年供电收入	万元	218.81
7	年供热收入	万元	528.86
8	年供冷收入	万元	377.75
9	年燃料费用	万元	336.75
10	初投资年折算值	万元	197.52
11	年维修费用	万元	63.64
12	年运行费用	万元	37.83
13	折旧费	万元	124.26
14	年利润	万元	365.42
15	动态投资回收期	a	5.4
16	净现值	万元	2727.81
17	内部收益率	%	20.62

2) 敏感性分析

为了找出对项目的影响最大的敏感性因素,分析其抗风险能力,针对热价、冷价、电价、气价及项目总投资等不同影响因素进行了敏感性分析,具体结果见表 7。

从表 7 中可以看出,对本案例影响最大的是供热价格,当供热价格降低 10%时,内部收益率由 24.95%降低为 22.11%;其次为天然气价格,当天然气价格增加 10%时,内部收益率降低为 22.82%;影响最小的是总投资情况,当总投资增加 10%时,内部收益率降低为 23.9%。

Table 7. Sensitivity analysis
表 7. 敏感性分析

项目	变化率	内部收益率(%)	敏感度系数
基本方案	/	24.95	/
天然气价格	10	22.82	2.13
	-10	27.08	-2.13
供电价格	10	26.09	-1.14
	-10	23.61	1.34
供热价格	10	27.58	-2.63
	-10	22.11	2.84
供冷价格	10	26.77	-1.82
	-10	22.93	2.02
总投资	10	23.9	1.05
	-10	25.81	-0.86

4.3. 系统环保性能分析

常规系统一次能源消耗量与分布式能源系统一次能源消耗量的差值即为一次能源节省量。

依据表 4 中的数据进行分析计算，可以通过以下公式得到系统各种污染物减排量。

$$\text{粉尘减排量} = \text{一次能源节省量} \times \text{粉尘排放因子}$$

$$\text{CO}_2\text{减排量} = \text{一次能源节省量} \times \text{CO}_2\text{排放因子}$$

$$\text{SO}_2\text{减排量} = \text{一次能源节省量} \times \text{SO}_2\text{排放因子}$$

$$\text{NO}_2\text{减排量} = \text{一次能源节省量} \times \text{NO}_2\text{排放因子}$$

总减排性能：

$$v = \sum_{i=1}^4 v_i = \frac{\text{一次能源节省量}}{\text{常规系统一次能源消耗量}} \times \text{总排放因子} \times 100\%$$

通过上述计算可知，采用分布式能源系统后，该项目每年比常规系统减排粉尘共 691.2 t、CO₂ 共 1700.2 t、SO₂ 共 127.5 t 以及 NO_x 共 38.1 t，相比原系统总减排性能达到了 22.7%，拥有非常好的环境效益。

5. 结论

本文对多能互补分布式能源系统的系统构建、设备配置及各项性能评价指标进行了深入的研究。通过将典型的天然气分布式能源系统与太阳能集热系统以及地源热泵系统结合起来，构建了一个多能互补的分布式能源系统，经过对其节能性、经济性、环保性等各项性能指标的详细分析，得出了以下结论：

1) 建筑能耗数据的统计和模拟，以及当地气候参数以及各种能源可利用量的统计，对于多能互补分布式能源系统的构建和设备的配置具有很重要的作用。由于存在多种能源互补供能，多能互补分布式能源系统较一般分布式能源系统结构更为复杂，系统的设备配置形式更加多样化，根据当地可利用能源种类的不同，有着不同的互补方式。

2) 分布式能源系统具有比常规系统更高的能源利用效率。分布式能源系统以太阳能集热系统以及地源热泵系统作为辅助热源，使得其一次能源综合利用率达到了 93.6%，拥有很高的节能效率，节能率为 22.3%。此外，其还具有良好的环保效益。相比常规系统，本项目每年可减少粉尘排放量为 691.2 t，减少

CO₂排放量为 1700.2 t,减少 SO₂排放量为 127.5 t 以及减少 NO_x排放量为 38.1 t,总减排性能达到了 22.7%。

3) 通过对分布式能源系统进行技术经济性分析,可知对经济性影响最大的是供热价格,当供热价格降低 10%时,内部收益率由 24.95%降低为 22.11%;其次为天然气价格,当天然气价格增加 10%时,内部收益率降低为 22.82%;影响最小的是总投资情况,当总投资增加 10%时,内部收益率降低为 23.9%。

基金项目

中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12QN39);河北省自然科学基金资助项目(E2012502016)。

参考文献

- [1] 曾鸣. 利用能源互联网推动能源革命[J]. 中国电力企业管理, 2016(34): 48-50.
- [2] 金红光, 隋军, 徐聪, 郑丹星, 史琳. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3161.
- [3] 肖钢, 张敏吉. 分布式能源技术解析[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015.
- [4] US Department of Energy (2017) US Energy and Employment Report (2017). 28-29.
- [5] Annex, M.A. and Rooze, G.J. (2016) Company Profiles: The “Big Four” German Utilities. Bloomberg New Energy Finance.
- [6] 郝伟. 丹麦能源利用及供热现状及对北京供热的启示[J]. 区域供热, 2016(5): 43-48.
- [7] 车巍. 丹麦绿色发展经验对我国生态文明建设的借鉴意义[J]. 党政视野, 2015(12): 39.
- [8] 王涛. 国内外天然气分布式能源发展的相关政策及分析[J]. 上海节能, 2016(9): 477-481.
- [9] 孙文. 分布式能源系统建模仿真及特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [10] 侯健敏. 多因素影响的中国分布式能源并网策略研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [11] 陈建平, 沈丽华, 周一军. 上海虹桥商务区能源中心低碳建设探索[J]. 区域供热, 2014(3): 52-56.
- [12] 阳厚斌. 我国分布式能源可持续发展研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [13] Zhu, Y. and Yang, J. (2016) Apply of 6F.01 Gas Turbine on Distributed Energy Resource. *Gas Turbine Technology*.
- [14] 张俊礼, 沈炯, 李益国. 微型燃气轮机分布式能源系统混合逻辑建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3354-3366.
- [15] 兰立雄, 刘力卿, 米增强. 冷电联供系统的多目标运行优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(5): 62-68.
- [16] 巢青, 傅鑫, 程卫国, 黄国平. 微型燃气轮机发电机与 APU 发展现状及关键部件研究进展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(2): 53-56.
- [17] Shafiee, Q., Guerrero, J.M. and Vasquez, J.C. (2013) Distributed Secondary Control for Islanded MicroGrids—A Novel Approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**, 1018-1031.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2259506>
- [18] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 346-351.
- [19] 海涛, 王路, 李珍珍, 吕会荣, 张朝, 李朝伟. 一种可变拓扑结构的太阳能光伏发电系统研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(10): 1465-1469.
- [20] Asumadusarkodie, S. and Owusu, P.A. (2016) The Potential and Economic Viability of Solar Photovoltaic Power in Ghana. *Energy Sources Part a Recovery Utilization & Environmental Effects*, **38**, 709-716.
<https://doi.org/10.1080/15567036.2015.1122682>
- [21] 韩中合, 祁超, 向鹏, 刘明浩, 王珊. 分布式能源系统效益分析及综合评价[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 31-36.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2328-0514，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aepe@hanspub.org