

天然气在分布式发电系统中的运用

林王清

浙江省天然气开发有限公司, 浙江 杭州 310052

摘要:作为智能电网核心的分布式发电对发电能源的质量提出了新的要求,为了分析分布式发电系统中发电能源的利用前景,有必要对相关传统化石能源的发电流程及利用效率进行研究。对天然气发电和燃煤发电的污染物排放量进行了分析,计算出主要污染物的排放量;基于燃气蒸汽联合循环的结构对天然气发电进行了建模研究,仿真计算出能效。相比传统的燃煤发电,天然气发电能有效降低污染物排放,提高发电效率。所以在分布式发电系统中,天然气无论在环保还是效率层面上都具有极大的运用前景。

关键词:智能电网;分布式发电;天然气发电;仿真;环保;效率

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.05.018

The Application of Natural Gas in Distributed Power Generation

Lin Wangqing

Zhejiang Provincial Natural Gas Development Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang, 310052, China

Abstract: As the core of smart grid, distributed generation puts forward new requirements for the quality of power generation energy. In order to analyze the utilization prospect of power generation energy in distributed generation, it is necessary to study the generation process and utilization efficiency of the fossil energy. Pollutant emissions from natural gas power generation and coal-fired power generation are analyzed and calculated. Based on the structure of gas-steam combined cycle, the modeling of natural gas power generation is studied, and the efficiency is calculated. Compared with coal-fired power generation, natural gas power generation can effectively reduce pollutant emissions and improve efficiency. Therefore, natural gas has a great application prospect in distributed generation in terms of environmental protection and efficiency.

Keywords: Smart grid; Distributed generation; Natural gas power generation; Simulation; Environmental protection; Efficiency

0 前言

天然气是一种主要由 CH_4 组成的气态化石燃料,相较于煤炭、石油等化石燃料,其有使用安全、热值高、洁净等优势^[1]。1785 年左右,英国首次将天然气应用于商业

用途,天然气的开发利用在全球范围内伴随着钻探技术的成熟和开采量增长逐步加大^[2]。一般认为,天然气是一种清洁能源,天然气的开发利用,对减少温室气体排放、改善大气环境、缓解对煤炭和石油的依赖有较大意义^[3]。

近年来,世界各国针对分布式发电系统,已开展了

收稿日期:2019-02-17

基金项目:浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ16E070001)

作者简介:林王清(1985-),男,浙江乐清人,工程师,硕士,主要从事天然气开发、利用、安全管理等方面的研究。

天然气的供能研究。美国国家可再生能源实验室 (NREL) 的 Pless J 等人^[4]对分布式应用中天然气 (NG) 和可再生电力 (RE) 混合系统进行了分析、建模;加拿大卡尔加里大学电子与计算机工程系的 Odetayo B 等人^[5]对分布式配电系统中的电力和天然气分配系统进行了综合规划研究;波兰华沙理工大学热工研究所的 Milewski J 等人^[6]对基于天然气内燃机的分布式发电控制策略进行了专题研究;美国德克萨斯大学奥斯丁分校的 Touretzky C R 等人^[7]对天然气分布式发电对电网的影响做了较为深入的研究;中国华北电力大学的 Dong Jun 等人^[8]在 ESSAEME 会议上论述了中国天然气分布式发电的发展现状、投资优势等相关内容;美国亚利桑那州立大学的 Kamdar K^[9]在其硕士学位论文中对配电小区中天然气分布式发电的燃气轮机设置进行了专题研究。

通过对天然气、煤炭等化石燃料在发电系统中的发电流程分析和污染物排放计算,以及对天然气发电能效的建模分析,研究天然气发电相对燃煤发电的优势,可作为分布式发电系统供能侧能源选择的基础工作,对深入开展天然气在分布式发电系统中运用的理论研究有较大意义。

1 分布式发电中的天然气供能

1.1 分布式发电

分布式发电,也可称为分散式发电^[10],是一种发电技术与系统。顾名思义,是一种属于较分散的发电方式,与传统集中式发电相对应,指的是较靠近负载端且发电功率在几千瓦至数百兆瓦之间的系统。

1.1.1 分布式发电的能源获取

根据分布式发电所使用的一次能源类型,分布式发

电的驱动能源类型可分为化石能源和可再生能源。其中化石能源是碳氢化合物或其衍生物,由古生物化石沉积而来,主要包括煤炭、石油、天然气等;可再生能源是自然界取之不尽,用之不竭的能源,主要包括太阳能、风能、水能、生物能等。此外燃料电池根据其一次能源获取情况,可划入化石能源或可再生能源的范畴。

1.1.2 分布式发电的优势

将分布式发电供能系统以微网的形式接入实际电网并网运行,既可以分布式利用,又可以对电网起到补充和辅助作用,是智能电网的重要组成部分^[11]。对比传统集中式发电,分布式发电主要优势有:

1) 减少输电损失。分布式发电大多靠近用电区,可以避免长程电力传输所造成的损失。

2) 增加发电量。可以充分开发利用各种可用的分散存在的能源,如小型太阳能发电站、居民区的生物能发电站等。

3) 自动化程度高。由于各类分布式发电都可使用整流、逆变及各类算法实现智能控制,易于实现模块组合化,进而实现全自动并网。另外可对供电区域的供电质量和性能进行实时监控。

4) 用电可靠。分布式供电相比大型集中供电系统,可大大提高系统的可靠度,在意外灾害发生时继续供电,可成为集中供电系统不可缺少的重要补充。

图 1 是典型的基于分布式发电的微网系统。图 1 中各分布式发电系统通过电力电子装置对各自系统进行供电^[12],并通过微网模式控制器结合每个分布式控制器对并到微网的电能质量进行控制;每个微网独立工作,通过断路器进行并网,从而吸收和反馈能量;并网模式控制器通过模式控制,调控各个子微网。

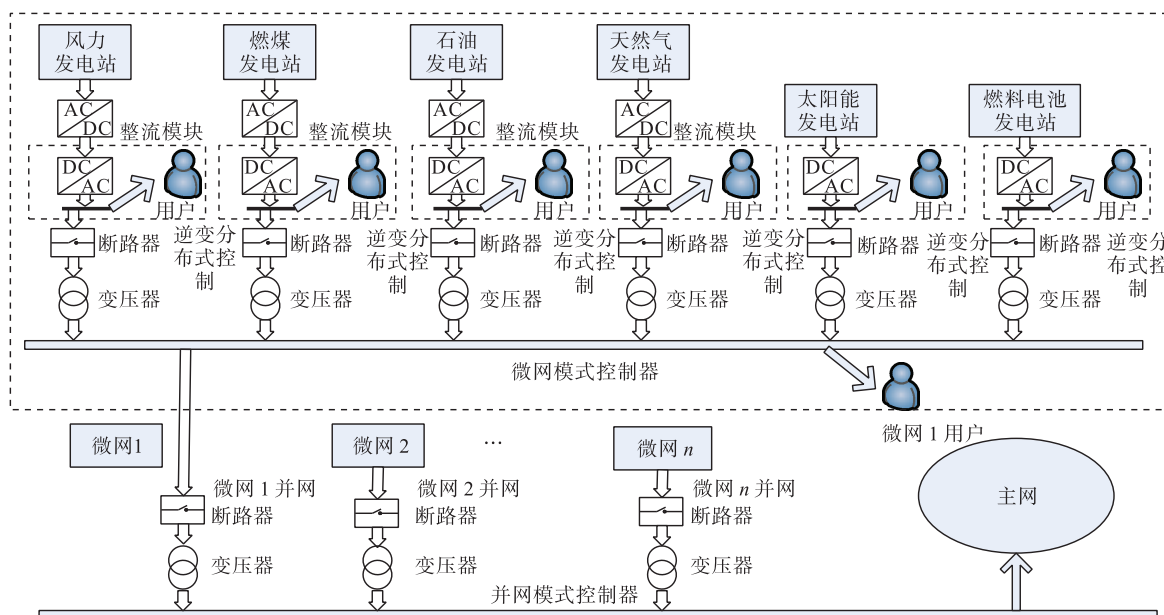


图 1 基于分布式发电的微网系统示意图

分布式发电和微网是智能电网建设的重要组成部分^[13],大电网与分布式发电相结合的微网运行方式是节省投资、降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性的主要方式,是未来电网发展的主要方向。

1.2 分布式发电中的天然气供能

目前,较为热门的天然气热电联产^[14]和天然气分布式能源等项目^[15],已将天然气作为发电能源进行利用,天然气热电联产是指由天然气供能的热电厂同时生产电能和可用热能的联合生产方式^[16];天然气分布式能源,是通过冷热电三联供等方式实现能源梯级利用的联产联供系统^[17]。天然气热电联产项目及天然气分布式能源站已在中国许多省份投产运行。

分布式发电系统是一种因地制宜的发电系统,相对于大电网,其能满足特定用户的需要,同时支持并网运行。对于分布式发电系统,各类发电能源的选择及获取尤为重要,以化石能源为例,相比煤炭、石油等化石能源,天然气储量丰富^[18],配套工业日益发展完善^[19],能成为分布式发电系统发电能源供给的重要来源。图2为分布式发电系统中天然气供能示意图,天然气发电系统通过就地获取的各类天然气资源进行发电,将余热进行利用,部分电能就地利用,多余电能与其他能源发电系统一并入微网或主网。

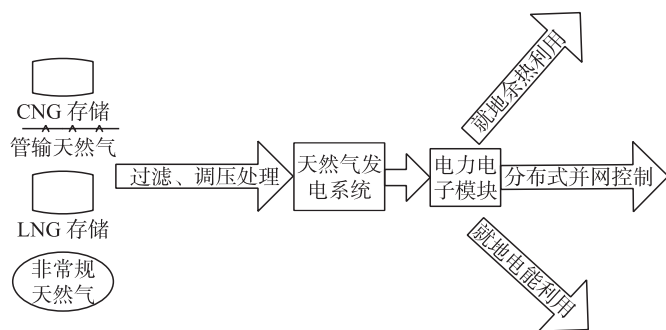


图2 分布式发电系统中采用天然气供能示意图

1.3 天然气发电的污染物排放

目前,世界范围内的发电主要以水力发电、火力发电和核能发电为主,其中火力发电比重最大,占50%以上,而火力发电又以化石燃料为主要发电能源。目前,煤炭在中国能源消费的占比达60%以上,燃煤发电机组在中国总装机容量的占比达60%以上,有必要将天然气发电与燃煤发电的污染物排放情况进行比较。图3和图4分别是燃煤发电和天然气发电的流程,其中天然气发电的模型基于燃气蒸汽联合循环方式。



图3 燃煤发电流程图

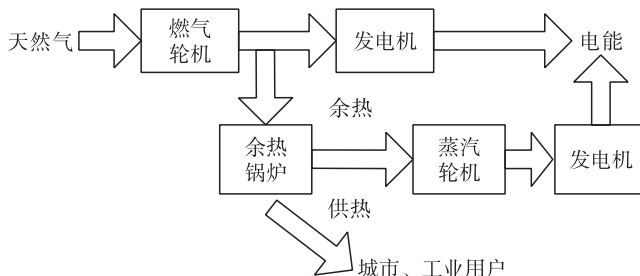


图4 天然气发电流程图

表1为每燃烧1 t煤和 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 天然气所产生的污染物量^[20],根据天然气与标煤的热值,计算得到表2中每发1度电所排放的污染物数据。

表1 污染物排放情况表

污染物	燃煤污染物排放量 / ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	燃天然气污染物排放量 / ($\text{kg} \cdot (10^6 \text{ m}^3)^{-1}$)
SO ₂	18.0	11.6
氮氧化合物	8	6 200
CO ₂	1 731	2 010 000
CO	0.26	0.00
悬浮颗粒物	0.4	238.0
灰渣	140	0

表2 每发1度电所排放的污染物表

污染物	燃天然气污染物排放量 / g	燃煤污染物排放量 / g
SO ₂	0.001 2	2.160 0
氮氧化合物	0.62	0.96
CO ₂	201.00	207.72
CO	0.000 0	0.031 2
悬浮颗粒物	0.023 8	0.048 0
灰渣	0.0	16.8

根据表2数据,相对于燃煤发电,天然气每发1度电排放的SO₂与悬浮颗粒物几乎为0,且不产生灰渣,在减少排放污染物上具有巨大优势。中国发电一次能源主要依赖于煤炭资源,考虑全球气候变化等环境因素和保障人类生活、生产的清洁需求,采用天然气作为分布式发电系统中的主要能源,减少SO₂、氮氧化合物以及粉尘的排放量,可大大改善环境污染问题。

2 天然气发电的仿真研究

为了更好地开展分布式发电中天然气供能控制策略研究,针对天然气供能的发电站开展研究,以图5所示的基于燃气蒸汽联合循环的天然气发电模型,对天然气发电进行了仿真建模,见图6。

仿真模型中各参数的对应物理量、仿真设定及取值见表3。

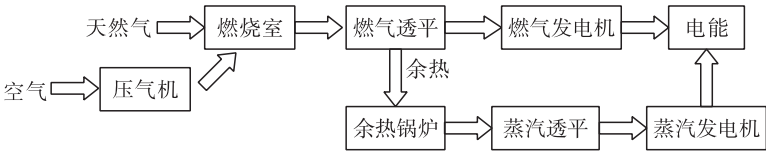


图 5 天然气发电模型图

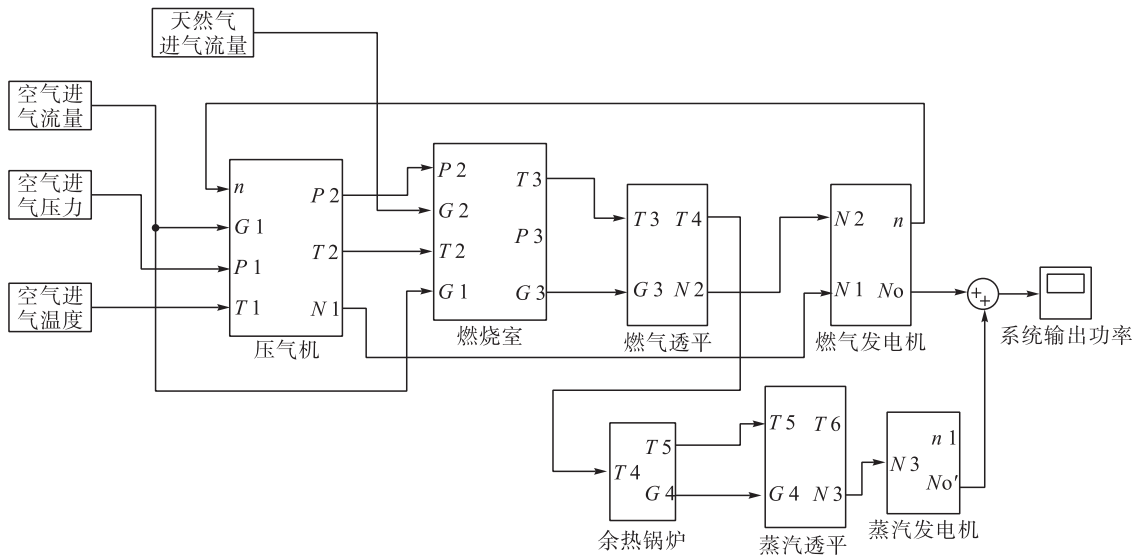


图 6 天然气发电仿真模型图

表 3 相关仿真实验数据表

仿真参数	物理概念	仿真设定及取值
$G\ 1$	压气机空气进气流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	确保天然气完全燃烧为 CO_2 和 H_2O , 根据天然气流量进行取证, 且设定空气进气中只含 N_2 和 O_2 , 含量比为 8 : 2, 仿真该参数取值 350
$P\ 1$	压气机空气进气压力 / Pa	设定空气进气为标准大气压, 仿真该参数取值 101 325
$T\ 1$	压气机空气进气温度 / K	设定空气进气温度为常温 20 $^{\circ}\text{C}$, 仿真该参数取值 293
$N\ 1$	压气机功率 / W	—
$P\ 2$	燃烧室进气压力 / Pa	—
$T\ 2$	燃烧室进气温度 / K	—
$G\ 2$	天然气进气流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	设定天然气含量全部为 CH_4 , 仿真该参数取值 6. 5
$T\ 3$	燃气透平进气温度 / K	—
$P\ 3$	燃烧室出口压力 / Pa	—
$G\ 3$	燃气透平进气流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	设定为空气进气流量和天然气进气流量之和
$T\ 4$	余热温度 / K	—
$N\ 2$	燃气透平输出功率 / W	—
n	燃气电机转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	—
N_0	燃气发电机输出功率 / W	设定为燃气透平负载功率
$T\ 5$	蒸汽透平进气温度 / K	设定为余热锅炉的主蒸汽温度
$G\ 4$	蒸汽流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	根据放热量及水的焓升确定
$T\ 6$	蒸汽透平输出温度 / K	—
$N\ 3$	蒸汽透平输出功率 / W	—
$n1$	蒸汽电机转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	—
N_0'	蒸汽发电机输出功率 / W	设定为蒸汽透平负载功率

模型中各个模块全部采取数学建模的方法,以燃气发电机模块为例,建模过程如下:

$$M = 9\,555 N_0 / n \quad (1)$$

$$dn / dt = 900 (N_2 - N_1 - N_0) / (J \pi^2 n) \quad (2)$$

式中: M 为电机转矩, $N \cdot m$; J 为燃气发电机转子转动惯量, $kg \cdot m^2$, N_0 、 n 、 N_1 、 N_2 分别对应表3中相关仿真参数。由式(1)、(2)得到燃气发电机模块,见图7。

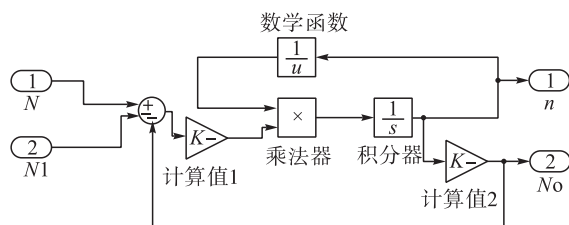


图7 仿真中的燃气发电机模块示意图

对天然气发电仿真模型进行实验仿真,得到燃气发电机输出功率 N_0 和余热温度 T_4 仿真波形,见图8~9。通过仿真结果计算得到燃气发电机的输出功率及余热温度分别为115 MW及800 K左右,通过余热锅炉及蒸汽轮机将余热利用起来,得到系统发电功率的仿真波形见图10。

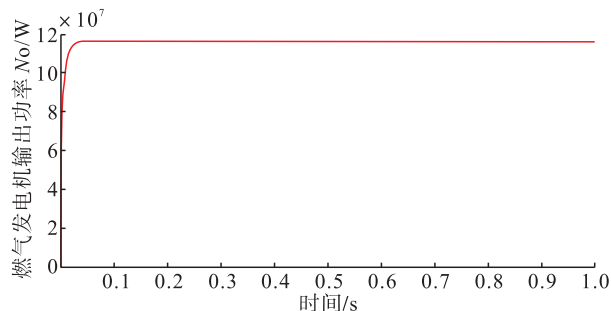


图8 燃气发电输出功率仿真波形图

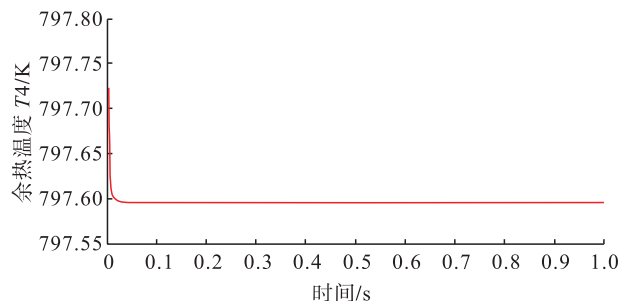


图9 余热温度仿真波形图

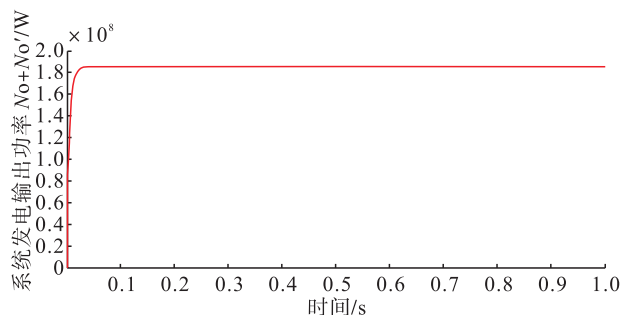


图10 天然气联合循环发电输出功率仿真波形图

根据设计模型,由仿真结果可知,在系统达到稳定工作后输出功率为185 MW左右。根据设定的天然气流量6.5 kg/s,计算出燃气轮机发电和联合循环系统效率分别为34%及54%左右,天然气联合循环发电能有效提高能源利用率。根据仿真结果可知,天然气联合循环系统与传统燃煤发电相比,能大大提高能效。

3 结论

中国的电源结构过度依赖于煤电,而煤电企业排放的各种废弃物是环境破坏的主要污染源之一。当前世界在大力发展智能电网的理论和实践研究,而分布式发电是智能电网的核心部分,在分布式发电系统中逐步以清洁能源和新能源代替各种高碳、低效的发电能源是分布式发电系统的发展方向。天然气作为相对环保、高效的优质化石能源,能显著降低 SO_2 、粉尘、 CO_2 的排放,极大地提高发电能效,在各类新能源利用条件成熟前能成为分布式发电系统中的清洁过渡能源,有极大的运用前景。

参考文献:

- [1] 王俊奇,刘 伟,郑 欣. 天然气利用与安全[M]. 北京:中国石化出版社,2011:1-3.
Wang Junqi, Liu Yi, Zheng Xin. Utilization and Safety of Natural Gas [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011: 1-3.
- [2] Soldo B. Forecasting Natural Gas Consumption [J]. Applied Energy, 2011, 92: 26-37.
- [3] 贺永德. 天然气应用技术手册[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
He Yongde. Technical Manual for Natural Gas Applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [4] Pless J, Arent D J, Logan J, et al. Quantifying the Value of Investing in Distributed Natural Gas and Renewable Electricity Systems as Complements: Applications of Discounted Cash Flow and Real Options Analysis with Stochastic Inputs [J]. Energy Policy, 2016, 97: 378-390.
- [5] Odetayo B, MacCormack J, Rosehart W D, et al. A Chance Constrained Programming Approach to Integrated Planning of Distributed Power Generation and Natural Gas Network [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 151: 197-207.
- [6] Milewski J, Szablowski Ł, Kuta J. Control Strategy for an Internal Combustion Engine Fuelled by Natural Gas Operating in Distributed Generation [J]. Energy Procedia, 2012, 14: 1478-1483.
- [7] Touretzky C R, McGuffin D L, Ziesmer J C, et al. The Effect of Distributed Electricity Generation Using Natural gas

- on the Electric and Natural Gas Grids [J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 500–514.
- [8] Dong Jun, Cai Hongxin. Current Situation and Problems of Natural Gas Distributed Generation Investment in China [C] // Hu Ted, Lee Xiaoming. *Proceedings of 2016 2nd International Conference on Economics, Social Science, Arts, Education and Management Engineering (ESSAEME 2016)*. Paris: Atlantis Press, 2016: 495–498.
- [9] Kamdar K. Optimal Capacity and Location Assessment of Natural Gas Fired Distributed Generation in Residential Areas [D]. Phoenix: Arizona State University, 2014.
- [10] 博伦,哈桑. 分布式发电接入电力系统[M]. 王政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015: 1–55.
- Bollen M H J, Hassan F. *Integration of Distributed Generation in the Power System* [M]. Wang Zheng, trans. Beijing: China Machine Press, 2015: 1–55.
- [11] 卢永,甘德强, Jiang J N. 美国智能电网和分布式发电重点方向的调研分析[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(9): 12–16.
- Lu Yong, Gan Deqiang, Jiang J N. Issues of Smart Grid and Distributed Generation Development in the United States [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(9): 12–16.
- [12] 博斯. 现代电力电子学与交流传动[M]. 王聪, 赵金, 于庆广, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005: 77–118.
- Bose B K. *Modern Power Electronics and AC Drives* [M]. Wang Cong, Zhao Jin, Yu Qingguang, trans. Beijing: China Machine Press, 2005: 77–118.
- [13] 王嘉庚,王磊,丛龙祥,等. 智能电网中分布式发电系统的多目标优化运行[J]. *智能电网*, 2017, 5(5): 448–452.
- Wang Jiageng, Wang Lei, Cong Longxiang, et al. Multi-objective Optimal Operation of Distributed Generation System in Smart Grid [J]. *Smart Grid*, 2017, 5(5): 448–452.
- [14] 任洪波,卢胤龙,吴琼. 基于供需耦合分析的天然气分布式热电联产系统环境效益动态评估[J]. *热力发电*, 2017, 46(10): 16–23.
- Ren Hongbo, Lu Yinlong, Wu Qiong. Dynamic Environmental Assessment for Natural Gas Cogeneration System Based on Supply-Demand Coupling Analysis [J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(10): 16–23.
- [15] 王圣,论立勇. 我国天然气分布式能源产业政策发展及相关建议[J]. *中国环境管理*, 2018, 10(3): 41–43.
- Wang Sheng, Lun Liyong. Industry Policy Development and Relative Suggestion of Natural Gas Distributed Energy System in China [J]. *Environmental Conformity Assessment*, 2018, 10(3): 41–43.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 供热术语标准: CJJ/T 55–2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China. *Standard for Terminology of Heating: CJJ/T 55–2011* [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [17] 中华人民共和国发展和改革委员会. 关于发展天然气分布式能源的指导意见[Z]. 北京: 国家发展改革委, 2011.
- National Development and Reform Commission. *Guidelines on the Development of Distributed Natural Gas Energy* [Z]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2011.
- [18] 叶张煌,王安建,闫强,等. 全球天然气格局分析和我国的发展战略[J]. *地球学报*, 2017, 38(1): 17–24.
- Ye Zhanghuang, Wang Anjian, Yan Qiang, et al. Global Pattern Analysis of Natural Gas and the Development Strategy in China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(1): 17–24.
- [19] 贾承造,张永峰,赵霞. 中国天然气工业发展前景与挑战[J]. *天然气工业*, 2014, 34(2): 8–18.
- Jia Chengzao, Zhang Yongfeng, Zhao Xia. Prospects of and Challenges to Natural Gas Industry Development in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(2): 8–18.
- [20] 魏学好,金建华,冯金海. 天然气发电的环境价值[J]. *燃气轮机技术*, 2002, 15(4): 9–12.
- Wei Xuehao, Jin Jianhua, Fen Jinhai. The Environmental Value of Electricity from Natural-Gas-Fired Power Plants [J]. *Gas Turbine Technology*, 2002, 15(4): 9–12.