

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.020

数据中心天然气分布式能源冷电联供技术方案与经济性分析

刘巍, 袁韩生

(南电能源综合利用股份有限公司, 广州 510530)

摘要: [目的]为了提高数据中心供电可靠性及降低运行能耗,提出了一种市电+天然气分布式能源系统的综合解决方案,并对该解决方案技术可行性和经济性进行分析,给出方案选择的依据。[方法]验证方案的可行性,对某数据中心能耗及分布式能源系统进行案例分析。[结果]分析表明:与常规数据中心相比,配套天然气分布式能源系统的数据中心在降低能耗方面具有一定的优势;天然气价、冷价、电价搭配合理的情况下,具有一定的经济性。[结论]所提出的技术方案和经济性分析是正确并有效的,可以为天然气分布式能源项目投资决策提供指导。

关键词: 天然气; 分布式能源; 数据中心; 供电; 可靠性

中图分类号: TK01; TP308

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)02-0112-06

Technical Solution and Economic Analysis for Natural Gas Distributed Energy Unit Combined Cooling and Power Supply of Data Center

LIU Wei, YUAN Hansheng

(Nandian Synthesis Energy Utilization co., Ltd., Guangzhou 510530, China)

Abstract: [Introduction] In order to improve the reliability requirements and effectively reduce energy consumption, the paper proposes a comprehensive solution for a mains + natural gas distributed energy system and analyze the technical feasibility and economy of the solution, and give support for the choice of the solution. [Method] To verify the feasibility of the solution, we took a certain data center as example, comparative analyzed the consumption and the distributed energy system of the project. [Result] The results we obtained demonstrate that compared with conventional data centers, data centers supporting natural gas distributed energy systems have certain advantages in reducing energy consumption. The solution has certain economics, when natural gas prices, cold prices and electricity prices are properly matched. [Conclusion] The solution and economics this work provided are correct and effective and can provide guidance for investment decisions in natural gas distributed energy projects.

Key words: natural gas; distributed energy; data center; power supply; reliability

由于数据中心高能耗问题,目前在珠三角地区项目落地已十分困难,天然气分布式能源系统给数据中心节能提供了一种有效措施。通过引入天然气分布式能源系统就地向数据中心供电和供冷,不仅可以提高数据中心的用电可靠性,更重要的是实现了能源梯级利用和电力就地消纳,有效降低了数据中心运行能耗,对提高区域能源综合利用率具有重要意义。

由于数据中心对供电可靠性要求很高,天然气分布式能源站不能作为独立电源供电,必须结合电网市电,采用“市电+分布式能源站”的综合能源解决方案,解决数据中心的供电和供冷问题。本文以建设中的广东某企业数据中心天然气分布式能源示范项目为例,从技术和经济角度对供电和供冷方案进行研究和分析。

1 数据中心能耗指标分析

数据中心 PUE 指标(Power Usage Effectiveness 电能利用效率)对新建数据中心方案设计和在运数

据中心运维管理等方面具有十分重要的作用。其计算公式为:

$$PUE = \text{总耗电量} / \text{IT 设备耗电量} \quad (1)$$

式中: PUE 指在供给数据中心总电能中, 有多少电能应用在 IT 设备上。PUE 值越接近 1 表示越节能, 值越大, 则表示空调制冷、UPS 损耗、照明、其他等数据中心配套设备所消耗的电能越大。目前, 国内部分一线城市相继出台严格控制数据中心 PUE 值的政策, 如北京、深圳、广州要求 PUE 值应在 1.4 以内, 上海甚至要求 PUE 值应在 1.3 以内。因此, 如何降低 PUE 值, 对国内数据中心的发展至关重要。

根据美国采暖制冷与空调工程师学会 (ASHRAE) 技术委员会统计报告显示, 数据中心用电量分布如图 1 所示。

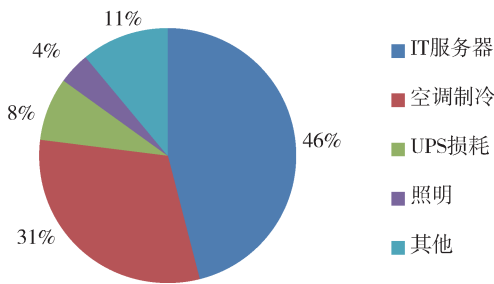


图 1 数据中心用电量分布

Fig. 1 IDC power consumption distribution

由图 1 可知, 空调制冷系统电耗在数据中心辅助配套设备中用电量占比最高, 达到 31%。因此, 空调制冷系统节电空间最大、成效最快, 若采用燃气-蒸汽联合循环供能系统(即 CCHP, Combined Cooling, Heating and Power)可以有效降低数据中心能耗和 PUE 值^[1]。

2 数据中心天然气分布式能源系统介绍

数据中心天然气分布式能源系统主要由综合能源站、IDC 大楼、变电站三大部分, 其中能源站所采用的发电设备主要有燃气轮机、燃气内燃机, 所采用的余热利用设备主要有余热锅炉以及余热(烟气、热水、蒸汽)吸收式制冷机等。根据所采用发电设备和余热利用设备可以得到不同的系统组织形式。

本数据中心供能方案采用燃气-蒸汽联合循环供能系统(即 CCHP, Combined Cooling, Heating

and Power), 主要采用燃气轮机+余热锅炉+汽轮机+吸收式制冷机的形式, 为数据中心提供电能和冷能^[2-4]。工艺流程如图 2 所示。

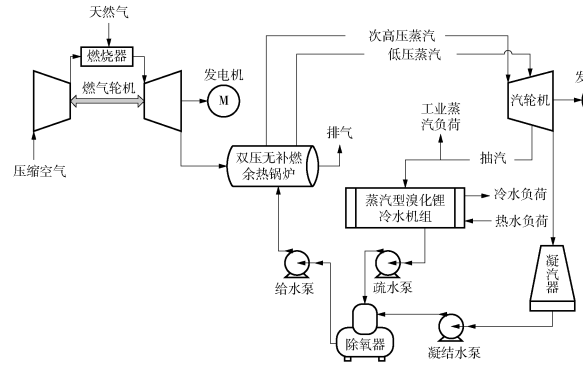


图 2 燃气-蒸汽联合循环工艺流程图

Fig. 2 Gas-steam combined cycle process flow chart

3 数据中心负荷分析

广东某企业数据中心二期拟建设 T3 级别数据中心机房楼 3 栋, 建设 T4 级别的数据中心机房楼 2 栋, 5 栋数据中心机房总计新增 15 077 个机柜的服务能力。为满足数据中心运转需求, 园区另拟建运维楼、综合楼、宿舍楼、生活楼、研发楼等主要建筑各 1 栋。

3.1 电负荷分析

广东某企业数据中心二期工程主要建筑物内用电设备装机功率如表 1 所示, 其中根据现阶段国内租赁外包企业数据中心平均机柜容量 4 kW~6 kW/个, 考虑同类型企业新建数据中心 IDC 机柜功率, 规划确定本数据中心 IDC 机柜功率为 4 kW/个。

表 1 广东某企业数据中心装机功率

Tab. 1 Installed power of an enterprise IDC in Guangdong

类别	机柜数量/个	IDC 机柜功率/MW	电制冷机功率/MW	其他设备功率/kW	设备总功率/MW
T3 机房楼	11.001	44.004	19.296	369	74.670
T4 机房楼	4.076	16.304	7.648	234	28.262
运维楼等	0	0	2.540	254	2.794
合计	15.077	60.308	29.484	857	90.649

由表 1 可知, 设计工况下用电设备满负荷运行, 数据中心装机功率为 90.649 MW。参考国内 IDC 经验数据, IDC 运行最大、最小运行负荷功率如表 2 所示。

表2 广东某企业数据中心最大、最小运行电负荷

Tab. 2 Maximum and minimum operating electrical load in an enterprise IDC in Guangdong

类别	装机功率/MW	最大电负荷		最低电负荷	
		同时利用系数	功率/MW	同时利用系数	功率/MW
IDC 机柜功率	60.308	0.9	43.422	0.9	27.139
电制冷功率	29.484	0.5	14.742	0.3	8.845
其他设备功率	0.857	0.5	429	0.3	0.257
合计	90.649	—	58.593	—	36.241

注：单个机柜负荷率，最大负荷取0.8，最小负荷取0.5。

综上所述，在考虑广东某企业数据中心二期工程设计工况下电负荷均有自有电制冷机组满足的前提下，最大、最小负荷分别为58.593 MW和36.241 MW。

3.2 冷负荷分析

广东某企业数据中心二期工程采用中温冷冻水系统(供/回水温度：12/18℃)为数据中心机房提供冷源；采用低温冷冻水系统(供/回水温度：7/12℃)为数据中心新风系统、运维楼、综合楼、办公及宿舍楼等其他主要建筑提供冷源。考虑广东地区地属夏热冬暖地区，不设集中采暖系统，其冷负荷随季节及昼夜变化。

运维楼、综合楼、办公楼等取单位冷指标120 W/m²，数据中心机房楼取围护结构显热为150 W/m²，每栋T3机房楼新风负荷为1900 kW，每栋T4机房楼新风负荷为1300 kW，照明和人体散热冷负荷为20 W/m²，考虑各栋机房楼IDC机柜及其他用电设备所耗电转化为热能形成设备散热冷负荷。广东某企业数据中心二期工程冷负荷构成如表3所示。

表3 广东某企业数据中心冷负荷构成

Tab. 3 Cold load composition of an enterprise IDC in Guangdong

类别	建筑面积/m ²	机柜数量/个	IDC 机柜功率/MW	其他设备用电功率/kW	维护照明人体冷负荷/MW	新风冷负荷/kW
T3、T4 机房楼	22 717	15 077	60.308	857	3.861	8.300
其他运维楼等	11 223	—	—	—	—	1.347
合计	33 940	15 077	60.308	857	3.861	9.647

参考国内IDC经验数据，考虑IDC机柜最大负荷运行取同时利用系数0.9，单个机柜负荷率0.8，其他用电设备利用系数为0.5；IDC机柜最小负荷运行取同时利用系数0.9，单个机柜负荷率0.5，其他用电设备利用系数为0.3。广东某企业数据中心二期工程最大、最小冷负荷如表4所示。

表4 广东某企业数据中心最大、最小冷负荷

Tab. 4 Maximum and minimum cooling load of an enterprise IDC in Guangdong

类别	建筑面积/m ²	最大中温冷负荷/MW	最小中温冷负荷/MW	低温冷负荷/MW
T3、T4 机房楼	22.717	45.781	28.554	8.300
其他运维楼等	11.223	—	—	1.347
合计	33.940	45.781	28.554	9.647

注：上表所示低温冷负荷供/回水温度7℃/12℃，中温冷负荷供/回水温度12℃/18℃。

综上所述，广东某企业数据中心二期最大、最小中温冷负荷分别为45.781 MW、28.554 MW。低温冷负荷为9.647 MW。

4 能源站装机方案

4.1 装机规模

根据广东某企业数据中心二期采用2路供电，一用一备的方式。采用“市电+天然气分布式能源站”的方式解决电力供应问题。其中市电来自规划新建110 kV变电站，该变电站规划提供3×63 MVA的容量。根据数据中心2路供电的要求，拟由变电站2台63 MVA变压器提供1路供电；由变电站1台63 MVA变压器+天然气分布式能源站提供1路供电。由此，能源站需提供63 MVA的容量。综上，考虑功率因素0.9，本数据中心天然气分布式能源站规模定为60 MW级。

4.2 装机方案

按照“以电定冷”原则，能源站根据数据中心电负荷确定以下2种装机方案，方案一主要设备配置如表5所示。

表5 方案一主要设备配置

Tab. 5 Solution 1 main equipment configuration

项目	设备型号	技术参数	单位	数量
燃气轮机发电机组	LM2 500	21.812 MW	套	2
余热锅炉	双压自然循环	5.5 MPa/510℃；31 t/h 1.1 MPa/250℃；3.4 t/h	台	2

表5(续) 方案一主要设备配置

Tab. 5(Cont.) Solution 1 main equipment configuration

项目	设备型号	技术参数	单位	数量
汽轮发电机组	C9-5.4/0.5	9 MW	套	2
蒸汽溴化锂制冷机	BS500	5.815 MW	台	8

方案二主要设备配置如表6所示。方案一和方案二技术经济指标如表7所示。

表6 方案二主要设备配置

Tab. 6 Solution 2 main equipment configuration

项 目	设备型号	技术参数	单位	数量
燃气轮机发电机组	PG6 581B	42.100 MW	套	1
余热锅炉	双压自然循环	3.82 MPa/450 °C; 70 t/h 0.7 MPa/170 °C; 8.9 t/h	台	1
汽轮发电机组	C18-3.7/0.5	9 MW	套	1
蒸汽溴化锂制冷机	BS500	5.815 MW	台	8

表7 方案一和方案二技术经济指标分析

Tab. 7 Analysis of technical and economic indicators for program 1 and program 2

项 目	数值	
	方案一	方案二
主机配置/MW	2 × (22 + 9) = 62	42 + 18
制冷规模/MW	8 × 5.815 = 46.52	8 × 5.815 = 46.52
年利用小时数/h	7 000	7 000
年耗天然气量/10 ⁴ m ³	9 170	9 732
年耗水量/10 ⁴ m ³	136.5	143.5
年发电量/GWh	358.85	369.25
年供电量/GWh	340.91	350.79
年供冷量/GWh	325.64	184.62
年热电比/%	95.5	92.8
能源利用效率/%	77	74

注: (1) 天然气年耗气量按低位热值(33.96 MJ/m³)估算; (2) 分布式能源站全年运行12个月即8 400 h, 根据全年累计负荷折算到机组额定负荷运行时间为7 000 h。

方案一和方案二都采用轮机联合循环、抽汽制冷, 可以根据数据中心冷负荷需求调节汽机的抽汽量。即使在不能对外提供冷负荷的特殊情况下, 汽机纯凝运行, 能源站也能获得较高的发电效率。

方案一采用两套LM2 500燃气轮机组, 该型燃气轮机是美国GE公司于上世纪六十年代以TF39涡轮风扇发动机为蓝本研制的航改式燃气轮机, 经过多年不断的升级改进具有高性能、高可靠性和高利用率等特点, 广泛应用于船舶动力、石油、化工、电力等行业, 在国内外具有丰富运维经验。方案二采用单套PG6 581B燃气轮机组, 该型燃气轮机是美国GE公司研制的单轴重型燃气轮机, 于

1978年投入商业运行, 广泛应用于热电联产项目及分布式能源项目, 但只建设单套机组的能源站在国内不常见。从数据中心分布式能源站运行可靠性、经济性、能源利用效率等方面综合考虑, 推荐装机方案首选方案一。

5 接入系统方案

数据中心供电系统要求是两个不同的可靠电源, 能源站发电机不属于数据中心供电要求的可靠电源, 因此数据中心供电系统必须与市电电网连接, 不能采用独立电源给数据中心供电。

能源站按最佳经济效益运行, 接入系统方案分两路专线, 一路新建1回110 kV专线, 将2 × 22 MW发电机组采用全额上网模式, 接入110KV变电站。一路新建4回10 kV专线, 将2 × 9 MW发电机组采用“自发自用、余电上网”模式, 接入数据中心10 kV配电房并接入电网。考虑能源站给数据中心直供电, 峰平时段平均电价高于上网电价(广东省气电上网电价为0.665元/kWh), 的低谷时段电价低于上网电价, 考虑项目最佳经济运行模式, 本接入系统设置直供数据中心和上网的10 kV线路切换开关, 通过每日切换实现2 × 9 MW发电机组峰平时段发电直供数据中心, 低谷时段发电上网。

此接入系统方案的优点是在提高能源站经济效益的同时, 能源站10 kV母线的短路电流相对较小(10 kV侧母线短路电流不超过25 kA), 满足安全运行要求。但最终能否实施还要看是否符合当地电力行政管理部门政策^[5-7]。

6 经济性分析

6.1 投资估算

根据电力工程建设预算编制标准, 方案一静态投资约60 270万元, 投资估算表如表8所示。

表8 方案一投资估算表

Tab. 8 Option 1 investment estimation

序号	工程及费用名称	方案一/万元
1	工程费用	49 400
1.1	建筑工程	9 800
1.2	设备购置	34 600
1.3	安装工程	5 000
2	工程建设其他费用	8 000
3	基本预备费[(1+2) × 5%]	2 870
4	项目静态投资(1+2+3)	60 270

6.2 成本单价及折旧摊销

天然气价格: 2.75 元/Nm³(含税, 当地管道燃气均价); 水费: 2.46 元/t(含税, 当地自来水公司报价); 职工薪酬: 1 000 万元/年; 固定资产修理费: 按固定资产原值的 3.0% 估算; 折旧费: 设备折旧按 15 年, 建筑折旧按 25 年, 净残值率取 5%。摊销费: 无形资产折旧按 50 年, 无残值率。

6.3 销售单价及税率

上网电价: 0.665 元/kWh(含税, 广东省 2018 年 9 月公布上网电价); 直供电价: 参照当地大工业电价, 峰平时段供电价优惠 1 分/kWh; 供冷价格: 0.47 元/kWh(含税, 某数据中心能接受的冷价); 所得税率: 25%; 增值税率: 16%(电、设备、耗材), 10%(天然气、供冷、供热); 城市维护建设税、教育费附加分别按增值税的 7%、5% 估算。

6.4 财务盈利能力分析

根据分布式能源站特点及建设进度安排, 项目估算期设定为 22 年, 其中建设期 2 年, 运营期 20 年。能源站按两种不同接入系统方案做财务评价指标分析, 方案一采取 2 × (22 + 9) MW 全额上网接入, 方案二采取 2 × 22 MW 全额上网 + 2 × 9 MW 直供/余电上网接入, 两种接入方案财务评价指标分析如表 9 所示。

表 9 两种接入方案财务评价指标

Tab. 9 Financial evaluation indicators for two access schemes

项目	2 × (22 + 9) MW 全额 上网接入方案	2 × 22 MW 全额上网 + 2 × 9 MW 直供/余电 上网接入方案
营业收入/万元	33 458	33 760
营业成本/万元	30 077	30 091
利润总额/万元	2 756	3 044
税后财务净现值 NPV ($I_c=8%$)/万元	-557	1 255
税后全投资内部 收益率 IRR/%	7.86	8.32
静态投资回收期/年	11.8	11.5

注: 营业收入、营业成本不含增值税。

按分布式能源站投资基准收益率不低于 8% 的标准, 在气价、冷价、上网电价边界条件锁定的情况下, 方案一 IRR = 7.86% < 8%, NPV < 0, 则在经济上不具备投资可行性。方案二 IRR = 8.32% > 8%, NPV > 0, 则在经济上具备投资可行性。

综上所述, 由于广东省近年不断下调气电上网

电价, 导致省内气电项目的盈利空间被进一步压缩。目前, 在省内气电价格不联动的情况下, 若使项目投资内部收益率大于 8%, 则必须考虑用户侧直供电 + 余电上网的接入方案^[8-9]。

6.5 气冷电价格联动分析

分布式能源站投资经济性, 主要由天然气价、供冷价、上网电价三者之间价格因素决定。若项目全投资内部收益率维持在 8% ~ 8.5% 范围内, 供冷价锁定为 0.48 元/kWh, 考虑未来广东省气电上网价在 0.665 元/kWh 基础上, 存在继续下调的可能, 本文按 10% 比例逐步下调, 对应的天然气价及函数关系如图 3 所示。

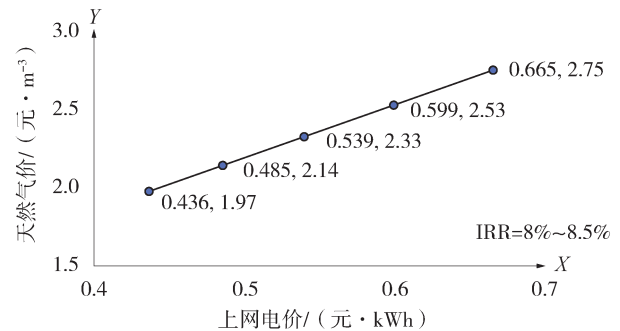


图 3 气冷电价格联动分析图

Fig. 3 Gas cooled electricity price linkage analysis chart

由上图可知, X 轴上网电价变动与 Y 轴天然气价变动呈线性关系, 通过已知数据拟合曲线公式为: $Y = 3.4068X + 0.488$ 。由此可知, 当 X 值(上网电价)下降 10% 时, 若满足项目全投资内部收益率 $\geq 8%$, 则对应 Y 值(天然气价)的下降比例须不低于 8%。

6.6 不同 PUE 值节能成本分析

以方案二数据中心规模为基础, 常规数据中心能源全部采用市电方案, 配套 CCHP 系统数据中心采用“自发自用, 余电上网”方案, 二种方案在不同 PUE 值情况下, 所对应的节能量和节能成本, 如表 10 所示。

表 10 不同 PUE 值节能量与节能成本分析

Tab. 10 Analysis of energy saving and energy saving cost of different PUE values

项 目	常规数据中心	配套 CCHP 系 统数据中心
总耗电量/(GWh · 年 ⁻¹)	331.92	255.46
IT 服务器耗电/(GWh · 年 ⁻¹)	152.68	152.68

表 10(续) 不同 PUE 值节能量与节能成本分析
Tab. 10(Cont.) Analysis of energy saving and energy saving cost of different PUE values

项 目	常规数据中心	配套 CCHP 系统数据中心
空调制冷耗电 /(GWh·年 ⁻¹)	109.22	—
UPS 损耗、照明及其他耗电 /(GWh·年 ⁻¹)	70.01	70.01
PUE 值	2.17	1.67
用能总成本/(万元·年 ⁻¹)	24 894	23 195
节能量/(GWh·年 ⁻¹)	—	109.22
节能成本/(万元·年 ⁻¹)	—	1 699

注: 市电均价按 0.75 元/kW·h, 天然气价按 2.75 元/m³, CCHP 余电上网收入抵扣运行总成本。

如表 10 所示, 与常规数据中心相比, 配套 CCHP 系统数据中心可使 PUE 值下降约 0.5, 若 UPS 损耗、照明及其他设备做相应的节能改造, PUE 值完全可以控制在 1.4 以内。CCHP 系统虽然对数据中心节能贡献巨大, 但考虑其巨额的投资, 在国家补贴政策不完善的情况下, 经济性问题仍然是制约其发展的最大障碍^[10-11]。

7 结论

随着互联网、云计算以及大数据等应用的快速发展, 国内数据中心的建设步伐正在加快。由于数据中心高能耗问题, 目前在珠三角地区项目落地已十分困难, 天然气分布式能源系统给数据中心节能提供了一种有效措施。在此类项目中, 对于如何将数据中心的高供电可靠性与天然气分布式能源供能系统两者有机结合, 本文给出了一种较为完善的供能系统方案和经济性分析, 主要可归纳为以下几点:

1) 采用燃气-蒸汽联合循环系统通过实现能源梯级利用, 可以为数据中心节省近 30% 的电量(余热制冷替代电制冷机), 有效降低数据中心耗电量, 缓解了区域电网的供电压力。

2) 燃气-蒸汽联合循环系统, 可以在机组不降负荷的前提下, 根据数据中心冷负荷需求灵活调节汽机的抽汽量, 相比内燃机+烟气溴化锂制冷系统, 数据中心冷负荷波动对其项目运行经济性造成的影响要小。

3) 接入系统方案, 采用 2×22 MW 发电机组以全额上网模式, 接入 110 kV 变电站。2×9 MW 发

电机组以“自发自用、余电上网”模式, 接入数据中心 10 kV 配电房并接入电网。一方面可以有效降低线路短路电流, 满足安全运行。另一方面部分机组采取峰平时段直供电+低谷上网模式, 可以提高能源站运行经济性。

4) 气冷电价格联动, 若未来分布式能源上网电价下调 10%, 若满足项目全投资内部收益率不低于 8%, 对应气价下调幅度应不低于 8%。

5) PUE 值节能分析, 与常规数据中心相比, 配套 CCHP 系统数据中心在节电方面具有巨大优势, 但在节能成本方面优势并不明显。

参考文献:

- [1] 李皓, 周唯, 刘文意. 数据中心降低 PUE 值的方法研究 [J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(4): 381-384.
- [2] 沈洪流. 数据中心天然气分布式能源系统供电方案设计 [J]. 浙江电力, 2018, 37(10): 14-18.
- [3] 印佳敏, 陈泽韩. 天然气分布式能源系统在大型数据中心的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 52-56 +10.
- [4] 黄镜欢, 施海云. 分布式能源站燃气内燃机的余热利用方式探讨 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 66-69.
- [5] 陈晓丽, 徐瑄浣, 汪庆桓, 等. 天然气三联供系统为数据中心供能的优势分析 [J]. 节能, 2016, 35(9): 30-34 +2.
- [6] 李晓. 天然气分布式能源系统在数据中心的应用 [J]. 低碳技术, 2016(17): 72-73.
- [7] 王龙, 曹建伟, 郑攀东, 等. 天然气能源站接入电网的运行方式及其稳定性研究 [J]. 浙江电力, 2017, 36(5): 1-4.
- [8] 李芳芹, 魏敦崧. 天然气热、电、冷三联供的热经济性分析 [J]. 动力学报, 2004(1): 143-146.
- [9] 王鹏鹰. 分布式能源系统经济性分析 [J]. 吉林电力, 2016, 44(5): 36-38.
- [10] 高智勇. 工业园应用燃气热电冷三联供系统的经济性分析 [J]. 节能, 2014, 33(3): 25-27 +4.
- [11] 王雁凌, 李蓓, 崔航. 天然气分布式能源站综合价值分析 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 136-142.

作者简介:



LIU W

刘巍(通信作者)

1983-, 男, 新疆伊犁人, 南电能源综合利用股份有限公司项目经理, 工程师, 经济师, 一级建造师, 中北大学热能与动力工程学士, 西北农林科技大学工商管理硕士, 主要从事分布式能源项目开发与研究 (e-mail) devoliuwei@163.com。