

DOI:10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2019. 11. 014

航改型燃气轮机在工业园区综合能源系统中的 应用探讨

Study of aero-derivative gas turbines applied in industrial park
integrated energy systems

陈向阳, 史炜
CHEN Xiangyang, SHI Wei

(华电通用轻型燃机设备有限公司, 上海 201108)
(Huadian GE Aero Gas Turbine Equipment Company Limited, Shanghai 201108, China)

摘 要:分析了工业园区综合能源系统的运行需求,介绍了航改型燃气轮机效率高、启停快、易调节等特点,并阐述其如何满足综合能源系统在“源-网-荷-储”各环节的需求,探讨航改型燃气轮机在综合能源系统的各种应用可能性。在能源供应侧,航改型燃气轮机是天然气分布式能源站的核心设备,实现多能供给,并可以和可再生能源进行互补;在电网侧,航改型燃气轮机可以为区域电网提供优异的辅助服务,保证电网的安全和经济运行;在储能侧,航改型燃气轮机可以和储能电池以及氢能集成为独特的混合发电系统。

关键词:综合能源系统;航改型燃气轮机;可再生能源;电力辅助服务;混合系统

中图分类号:TK 472 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951 (2019) 11 - 0057 - 05

Abstract:To analyze the operation requirements of industrial park integrated energy system, the characteristic of aero-derivative gas turbine are introduced which are high efficiency, quick startup, simple adjustment, etc. The requirements of integrated energy system on each section in “source-network-load-storage” are explained, and feasibility of applying aero-derivative gas turbine in industrial park is discussed. Aero-derivative gas turbine is the core equipment for natural gas distribution energy station on power supplying side. It can provide multiple energy and complement renewable energy. As for the grid side, aero-derivative gas turbine can provide excellent auxiliary services for the regional power grid, which ensures its stable and economical operation. On power storage side, aero-derivative gas turbine integrated with batteries and hydrogen energy can also make up a unique hybrid system.

Keywords:integrated energy system; aero-derivative gas turbine; renewable energy; auxiliary power services; hybrid system

0 引言

能源互联网是推动我国能源革命的重要战略支撑,可以有效提升能源综合效率^[1]。能源互联网以电力系统为中心,将电力系统和天然气网络、供热网络以及工业、交通、建筑等系统紧密联系,可以横向实现电、气、热(冷)、可再生能源等多能互补,纵向实现“源-网-荷-储”各环节高度协调,集中和分布相结合的能源服务网络^[2]。而综合能源系统 IES (integrated energy system) 是源、网、荷深度融合、紧密互动的集成化能源系统,是能源互联网的重要物理载体^[3]。未来园区能源互联网是能源系统的基本

单位,更是综合能源服务的基本落脚点。在能源互联网背景下,工业园区单一的电、热、冷能源供应转向综合能源服务将成为不可阻挡的发展趋势^[4]。

工业园区能源互联网其实质是多能互补基础上的综合能源服务^[5-6]。在工业园区采用综合能源系统,横向可以在供应侧实现可再生能源和传统能源的多能互补,纵向可以通过“源-网-荷-储”协调,形成多能“供-需-储”自平衡体^[7]。

航改型燃气轮机(以下简称航改燃机),目前已成功应用在很多工业园区的分布式能源站上,通过与余热锅炉和汽机系统结合形成联合循环,供应电、热、冷等,满足工业园区客户的基本需求。但与多能互补、“源-网-荷-储”高度协调的综合能源系统,还有很大的差距。航改型燃气轮机源自航空发

动机技术,具有效率高、启停快、调节灵活、负荷跟随能力强等特点,这些特点和能力使得航改燃机在建设工业园区综合能源系统中有着独特的一席之地。本文主要探讨航改燃机在工业园区综合能源系统中的应用可能性。

1 工业园区综合能源系统的特点

不同类型的工业园区呈现电、热、冷等多元化的用能需求,但都可以通过多能互补综合能源技术来生产和供给。工业园区综合能源系统,一般由以下几部分组成: 供能网络单元(如天然气电、热、冷网络)、能源转换单元(如燃气轮机冷热电三联供(CCHP)、风电、太阳能光伏发电、锅炉、热泵、制冷空调、热交换器等)、能量存储单元(如储电、储气、储热、储冷、储氢等)、终端综合能源供给单元(如微网)和终端用户。工业园区综合能源系统为满足终端用户的用能需求,应具备可靠、清洁、高效、智能、经济等特点^[8]。

电力系统作为工业园区综合能源系统的核心, 需要实现“源-网-荷-储”的协调运行。(1)在能源供应侧,综合能源系统应采用高效、经济、低污染的灵活发电资源,实现电、热、冷、气等多种能源的供给能力,同时尽量采用清洁能源,具备多能互补的综合能源供应能力。(2)在电网侧,综合能源系统可以接纳多样化电源并进行优化组合,构建强壮的微网,降低可再生能源以及用户负荷波动影响,同时具备能源供需自平衡和黑启动能力,提高电网的可靠性。电网应能满足多种能源的负荷需求,对状态偏离、设备故障等意外事件具有不平衡校正能力,实现微网内部“源-网-荷-储”各元件的自适应主动控制,符合电、热(冷)、气多种能源供应的安全可靠性和质量要求。(3)在储能侧,将各种储能设备视为广义的需求侧资源进行管理,根据可再生能源的波动,进行储能资源的有序充放电,增强可再生能源的接纳能力。

2 航改燃机在工业园区综合能源系统中的应用

航改燃机是由航空发动机改型而来,大量使用航空级高温合金,采用中空薄壁结构,其效率高、启停快、调节灵活、负荷跟随能力强,且启停次数一般不影响机组寿命和性能。这些特性使得航改燃机能够满足综合能源系统在“源-网-荷-储”各个环节的要求:(1)在能源供应侧,与余热锅炉以及汽轮机组成热、冷、电三联供机组,实现能源的梯级利用,能源利用率超过 70%;同时航改燃机调节灵活,负

荷跟随能力强,可以跟随工业园区内风能/太阳能的波动进行快速调节;(2)在电网侧,航改燃机可以为区域电网提供优质的电力辅助服务。航改燃机启停快,启停不折损寿命,具备优异的调峰能力,使得航改燃机发电机组非常适宜作为紧急备用机组和黑启动机组,同时,其快速灵活的调节能力,可以为电网提供优质的一次和二次调频服务。另外,航改燃机还可以作为同步调相机运行,为电网提供无功调节服务;(3)在储能侧,航改燃机可以和储能电池系统集成成为混合发电系统,实现即时响应的备用能力,同时,航改燃机也可以燃用可再生能源制备的氢气,实现氢气储能。

本文以世界上广泛应用的 LM 航改燃机为例,探讨其在工业园区综合能源系统中的应用。

2.1 冷、热、电多能供给,梯级利用

以 LM2500 + G4 航改燃机为例,其标准工况下单循环发电效率可达 37.5%,排烟温度达到 550℃,和余热锅炉、汽轮机(抽凝式或背压式)组成联合循环机组,形成电、热、冷三联供能力,是理想的工业园区天然气分布式能源站核心发电设备。

图 1 是一个典型的 LM2500 + G4 联合循环发电机组的电、热、冷供应系统,其能源利用效率可达 85%,系统的经济性较好。

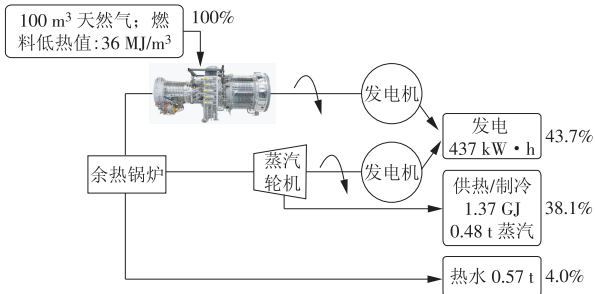


图 1 典型 LM2500 + G4 联合循环三联供机组

Fig. 1 A typical LM2500 + G4 CCHP unit

2.2 多能互补的综合能源

近年来可再生能源发展非常迅速,分布式可再生能源,如分布式光伏发电和分布式风能也已开始应用于工业区综合能源系统。由于光伏、风力发电具有间歇性、随机波动性、不可控性、季节性等特点,造成弃风弃光等现象,同时也对电网的接入和稳定运行产生不利影响。可再生能源的这种大幅、快速波动,要求区域电网中的其他发电设备必须能够快速地进行负荷调节,以适应可再生能源的变化。美国加州电力市场(CAISO)区域电网,其可再生能源渗透率高,图 2 是 CAISO 典型春季某日的净负荷(净负荷 = 实际电网需求 - 风电出力 - 光电出力)变化曲线,可以看出在 21:00 左右用电高峰来临前,正好是光伏发电出力下降的过程,此时净负荷短时

间内快速上升,甚至达到 11 000 MW^[9]。图 3 是 2018 年 4 月 19 日,CAISO 区域电网当天各种可再生能源的出力变化情况,白天时光伏出力很大,但受天气变化的影响,在 14:30 左右,几分钟内就有 1 400 MW 左右的出力下降。

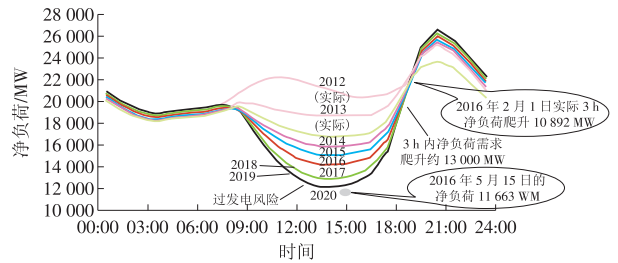


图 2 加州 CAISO 区域电网典型春季某日的净负荷变化趋势

Fig.2 Trend of net load of the regional power grid in CAISO, California on a typical spring day

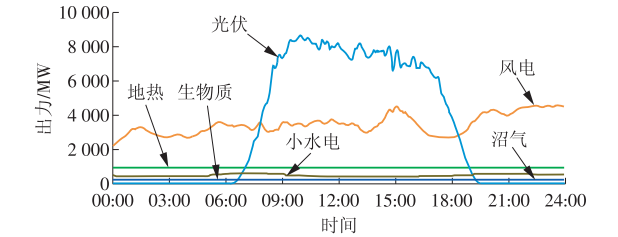


图 3 加州 CAISO 2018 年 4 月 19 日当天可再生能源变化趋势

Fig.3 Trend of renewable energy on April 19, 2018 in CAISO, California

对于工业园区综合能源系统,分布式可再生能源也会发生类似的情况,综合能源系统中需要其他的发电形式能够快速、大幅调节,以平衡可再生能源造成的波动。而航改燃机是理想的负荷跟随机组,可以和可再生能源形成多能互补的、稳定的园区综合能源系统。

LM2500 + G4 航改燃机发电机组负荷调节快速,其满负荷虽然只有约 33 MW,但其负荷变化速率可高达 30 MW/min,远高于燃煤机组和工业型燃气轮机,可以快速跟随可再生能源的负荷波动。同时,其部分负荷效率较高,且在部分负荷下,其 NO_x 污染物排放也较低,使得其在部分负荷下运行也具有较高的经济性。在园区综合能源系统中,可再生能源出力降低时,航改燃机发电机组可以迅速增加负荷,补偿光伏和风能的出力缺口;可再生能源出力增加时,航改燃机发电机组可以快速降低负荷,甚至停机以匹配光伏和风能出力,从而保证区域电网的相对稳定。

2.3 航改燃机为区域电网提供优质的辅助服务

2.3.1 调峰和备用

航改燃机从冷态启动到满负荷,最快只需要 5

min,且启停次数不折损寿命,适合作为调峰机组运行。图 4 是某 LM6000 航改燃机发电机组出力随时间的变化曲线,可以看出在短短的 1 d 内机组启动十几次,以适应电网的需求。而航改燃机出力较小,与工业园区电网容量匹配性较好,可以匹配工业园区综合能源系统的调峰需求。

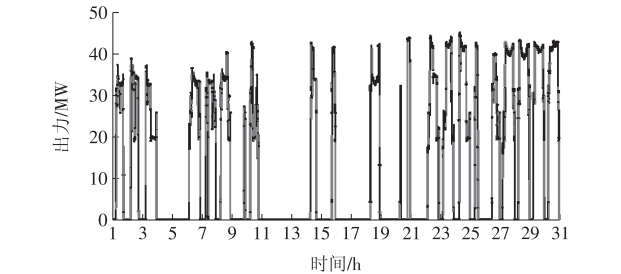


图 4 某 LM6000 航改燃机出力随时间变化曲线

Fig.4 Trend of the output of a LM6000 aero-derivative gas turbine changing over time

当然,航改燃机发电机组也可以作为电网的备用机组,快速响应电网调度,3 min 就开始输出电力,5 min 就可以输出满负荷。LM2500 机组的标准启动曲线如图 5 所示。如果航改燃机和储能电池系统配合起来应用,则可以构建一个实时响应电网需求的备用机组。

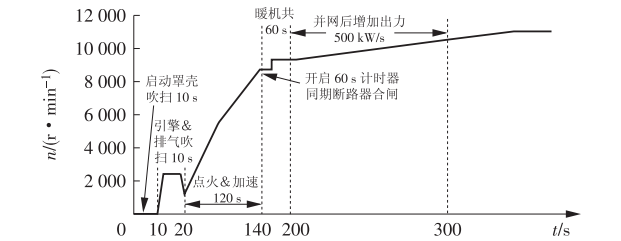


图 5 LM2500 燃气轮机标准启动曲线

Fig.5 Standard startup curve of an LM2500 gas turbine

当然,优秀的调节能力也使得 LM2500 航改燃机组具备优异一次调频和二次调频自动发电控制 (AGC) 能力。

2.3.2 黑启动能力

LM2500 航改燃机发电机组在设计之初就已经考虑到了作为黑启动电源的应用,其自身辅助设备少,辅助负荷需求也较少,辅机负荷只有约 250 kW,对黑启动柴油机要求较低,如果配备储能电池系统,则可以通过电池来供应辅机负荷所需电力,无需配备黑启动柴油机。同时,LM2500 航改燃机在较低的燃气压力(约 1.8 MPa)下就可以启动,对燃料系统要求低。控制系统配置了黑启动程序,操作流程比较简单,可以很好地满足客户对于黑启动的应用需求^[10-11]。

续表			
项目	单独 LM6000 发电机组	纯电池储能 10 MW,4.3 MW/h	混合系统
快速频率调 节/MW	0	10	10~25
无排放黑启 动	×	×	√

2.4.2 航改燃机和氢能混合系统

航改燃机的一个重要特点是可以燃用多种多样的燃料,包括氢气。可再生能源发电的波动性造成了弃风、弃光时有发生,2018 年中国全年弃风量为 27.70 TW·h,弃光量为 5.49 TW·h。通过水解将可再生能源发电产生的多余电能用于电解水,产生氢气并进行储存,单独供应给燃气轮机,或与天然气混合后供给燃气轮机作为燃料,这是降低可再生能源波动性,并提高多能互补的园区综合能源系统稳定性的一种可行方案^[12-13],如图 9 所示。

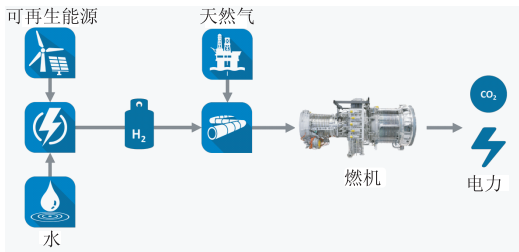


图 9 典型可再生能源、氢能和燃机混合系统

Fig.9 Typical hybrid system with renewable energy, hydrogen energy and gas turbine

3 结束语

航改燃机因为集成了航空发动机的技术特点,具备效率高、启停快、易调节等优势,能够匹配工业园区综合能源系统在“源-网-荷-储”各环节的运行需求。燃用天然气的航改燃机,可以和余热锅炉、汽轮机形成联合循环,对工业园区供电、热、冷,形成分布式能源站,实现能源的高效综合利用。航改燃机还可以作为负荷跟随机组运行,和可再生能源形成多能互补的、稳定的电力供应能力。同时,航改燃机还可以向园区电网提供多种优质的电力辅助服务,如一次调频、AGC、AVC、应急备用等。还可以和电池储能、氢能利用结合起来,形成混合系统,提高园区综合能源系统的能源利用率和可靠性。

参考文献:

[1] 国家能源局. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. [2016-02-29]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.

[2] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术,2016,40(1):114-124.

[3] 张巍,董昕昕,孙伟卿,等. 能源互联网中的综合能源系统研究[J]. 自动化仪表,2017,38(1):12-15.

[4] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报,2016,31(1):1-13.

[5] 杨锦成,骆建波,康丽惠,等. 区域能源互联网构架下的综合能源服务[J]. 上海节能,2017(3):137-146.

[6] 顾志祥,孙思宇,孔飞,等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术,2019,41(3):8-13,42.

[7] 刘敦楠,徐尔丰,许小峰. 面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J]. 电网技术,2018,42(3):681-689.

[8] 戚艳,刘敦楠,徐尔丰,等. 面向园区能源互联网的综合能源服务关键问题及展望[J]. 电力建设,2019,40(1):123-132.

[9] CAISO. What the duck curve tells us about managing a green grid[EB/OL]. (2015-04-29)[2018-07-10]. https://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelpRenewables_FastFacts.pdf.

[10] 陈靖,江婷,徐静静,等. 天然气冷热电蒸汽联产系统经济性分析[J]. 华电技术,2018,40(11):68-71.

[11] 邱冬,高彦生,陈向阳. LM 系列航改型燃气轮机作为黑启动电源的探讨[J]. 华电技术,2019,41(6):64-66.

[12] 蔡国伟,孔令国,薛宇,等. 风氢耦合发电技术研究综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(21):127-135.

[13] 邵旭峰. 区域型分布式能源燃气轮机机组选型分析[J]. 华电技术,2018,40(1):65-67,70.

(本文责编:张帆)

作者简介:

陈向阳(1979—),男,上海人,工程师,硕士,从事航改型燃气轮机发电机组系统集成研究(E-mail:oliver.chen@hd-ge.com)。

史炜(1981—),男,上海人,助理工程师,硕士,从事航改型燃气轮机发电机组系统集成研究(E-mail:winston.shi@hd-ge.com)。