

以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统方案

肖 利, 曾成碧, 李纪财

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 简要介绍了分布式供能系统及微型燃气轮机的相关概念, 着重分析了以微型燃气轮机为核心的冷热电联供系统和微型燃气轮机—燃料电池联合循环系统, 并将这些供能系统以模块化的形式表示。在模块化组合形式的基础上提出相关结合技术和优化方法, 为分布式供能系统的建模与进一步的仿真优化打下良好的基础。

关键词: 分布式供能系统; 微型燃气轮机; 联供/联合循环系统; 模块化系统

Abstract: A brief introduction of distributed energy resource system and micro-turbine is presented, heating and cooling power system and micro-turbine-fuel cell combined cycle system are analyzed emphatically, and these systems in the form of modulation are indicated. Some correlative association technologies and optimization methods are proposed on the basis of the modulation in order to build the good foundation for further modeling and simulation of the distributed energy resource system.

Key words: distributed energy resource system; micro-turbine; combined/hybrid cycle system; modularized system.

中图分类号: TM611.7 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)02-0078-04

纵观世界各国的经济发展历程, 人均 GDP 从 10 000 到 30 000 美元的时段对能源的需求基本没有变化, 而需求增长最快的阶段是 1 000 至 10 000 美元阶段。根据中国国家统计局不久前公布的 2006 年国民经济统计数字, 中国人均 GDP 首次超过 2 000 美元, 预计 2020 年将达到 3 000 美元。可见, 中国在今后很长一段时间内对能源的需求量会不断增长。所以, 中国在能源利用问题上面临的严峻挑战是如何少走弯路, 达到高效、节能、环保的目的。

分布式供能作为未来世界能源技术的重要发展方向, 具有能源利用率高, 环境负面影响小, 能源供应可靠性高, 经济效益好等诸多优点。要解决目前世界能源面临的四大问题: 合理调整能源结构; 进一步提高能源利用效率; 改善能源产业的安全性; 解决环境污染, 分布式供能系统作为集中供能系统的有益补充功不可没。

下面简述以微型燃气轮机为核心的几种主要的分布式能源系统, 以模块组合的形式给出, 并在模块化模型的基础上提出相关的组合技术或优化方法, 为中国分布式能源系统的仿真优化打下良好的基础。

1 分布式供能系统

分布式供能系统是相对传统的集中供能系统而言的, 是指将系统以小规模、分散式的方式布置在用

户附近, 可独立地输出电、热或(和)冷能的系统, 主要指分布式供电及部分冷热电联供。当今用于分布式供电的设备主要有微型燃气轮机、燃料电池和内燃机。表 1 给出了分布式供能系统中主要的几种分布式发电技术。

表 1 分布式发电技术

| 发电技术 | 能源种类 |
|----------|-------|
| 内燃机发电 | |
| 燃气轮机发电 | |
| 微型燃气轮机发电 | 化石能源 |
| 常规燃气轮机发电 | |
| 燃料电池发电 | |
| 太阳能发电 | |
| 风力发电 | 可再生能源 |
| 小水利发电 | |
| 生物质发电 | |
| 氢能发电 | 二次能源 |
| 垃圾发电 | 一般废弃物 |

化石能源是目前国际上分布式发电技术的主要能源; 先进的微型燃气轮机由于其具有尺寸小、重量轻、燃料适应性强、低燃料消耗率低、污染物排放少, 噪音低、振动小等一系列优点, 可广泛应用于各种分布式发电系统和冷热电联供系统。所以, 先进微型燃气轮机将成为中国 21 世纪分布式供能系统的主流设备之一。

2 先进微型燃气轮机的工作原理

微型燃气轮机是单机输出功率范围为 25~300 kW,以天然气、甲烷、汽油、柴油等为燃料的超小型燃气轮机,由燃气透轮机、压气机、燃烧室、回热器、发电机及逆变控制部分组成。有回热的微型燃气轮机的简单循环热效率能够达到 20%~30%,由微型燃气轮机和高温燃料电池组成的联合循环系统发电效率能达到 60%以上,而由微型燃气轮机组成的冷热电联产系统效率可以超过 80%。

先进微型燃气轮机采用向心式涡轮机、离心式压气机和高校板式回热器,并且高速交流发电机与燃气轮机设计为一体。微型燃气轮机工作时,从压气机排出来的高压空气先在回热器内接受透平排气的预热,然后进入燃烧室与燃料混合燃烧。发电机与压气机、透平同轴,透平旋转带动发电机发出高频交流电。微型燃气轮机工作原理示意图如图 1 所示。

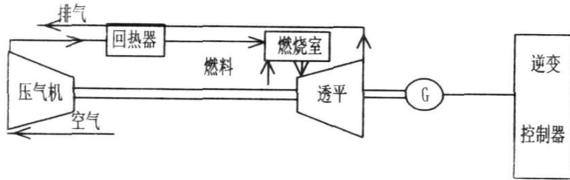


图 1 微型燃气轮机工作原理示意图

根据美国盖乐普公司 1999 年的调查,中国的微型燃气轮机需求量约在 1 500~1 900 台。中国冷热电联产系统起步较晚,主要受到天然气的限制。由于西气东输工程的实施,很多城市特别是长江三角洲地区的一些经济发达的省市有了较稳定的天然气供应,以微型燃气轮机为核心的分布式能源需求表现将会更为积极,所以对微型燃气轮机进行模块化的仿真分析是一项极为重要的项目。

微型燃气轮机的性能受到很多因素的影响,主要包括环境温度、压缩机等熵效率、涡轮机等熵效率、回热器回热温度、压缩比、涡轮机进口温度等。在对其进行研究的过程中主要是在仿真分析中优化微型燃气轮机的有效参数,不断改善其工作性能。

3 微型燃气轮机的分布式冷热电联供系统

冷热电联产系统作为分布式能源系统的一个主

要发展方向,由于节能、环保,可增加用户电力可靠性等诸多优点,在国内外已得到广泛重视。分布式冷热电联供系统是各种一次能源转换技术的集成运用,它是在一个区域内同时提供用户对电热冷等多种终端用能需求,以实现能源梯级利用、高效环保的系统。

以微型燃气轮机(MT)为核心的冷热电联供系统建立在能源梯级利用基础上,目的在于提高能源利用率,减少 CO₂ 及有害气体排放。表 2 列举了以微型燃气轮机为主的冷热电联产(CCHP)系统方案。

表 2 微型燃气轮机冷热电联产系统方案

| 项目 | 系统设备 | 功能 | 热效率(%) |
|------|-----------------------|------|--------|
| 方案 1 | MT+余热锅炉 | CHP | 80.5 |
| 方案 2 | MT+余热锅炉+热水 溴化锂制冷机组 | CCHP | 70.4 |
| 方案 3 | MT+排气再燃型空调机 | CCHP | 80 |
| 方案 4 | MT+排气再燃热交换型空调机 | CCHP | 83 |
| 方案 5 | MT+热水锅炉+电制冷机 | CCHP | 80.5 |

典型冷热电三联产系统一般包括:动力系统和发电机(供电)、余热回收装置(供热)、制冷系统(供冷)等。可以针对不同的用户需求,选择不同的冷热电联产系统方案。图 2 为方案 2 的系统模块图。

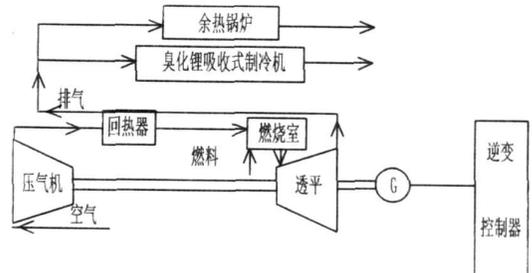


图 2 冷热电联供系统

文献[3]研究表明:冷热电联产系统在高负荷时有明显节能优势,但在负荷降低时,节能优势逐渐减少,甚至当负荷降到一定程度下时,节能性能不如参照系统。此种情况下可以考虑冷热电联产系统与蓄能技术相结合。

理论上,冷热电三联产系统与植物大棚联合循环,排放的 CO₂、水蒸汽、少量的氮氧化物和余热能促进植物生长,从而达到零排放和全能量利用的效果。

因此,可以在模块化仿真的基础上考虑设计柔性

联产系统,使之能够适应不同季节,不同时段各种负荷,并保持终端能源利用效率最高,希望最终能够达到的目标是使系统能够在各种变化的市场经济条件、气候条件和负荷条件下实现优化的运行和控制。

4 微型燃气轮机—燃料电池联合循环系统

燃料电池将燃料的化学能直接转化为电能和热能,因其自身优良的环保性和高效率,使其作为新一代发电系统备受各国关注。从环境友好性方面来看,燃料电池更被认为是分布式供能系统的优先选择。高温燃料电池由于燃料的多样性及高品位余热,因而与微型燃气轮机组成联合循环发电系统性能更佳。目前,能与微型燃气轮机组成联合循环发电系统的高温燃料电池有熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)。

根据美国能源部的研究,固体氧化物燃料电池(SOFC)和熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)与燃气轮机(MT)组成的联合循环发电系统可以获得 70% 以上的发电效率,除 CO₂ 之外,联合循环系统的其它排放几乎为零。

微型燃气轮机—高温燃料电池的联合循环系统(MCFC—MT、SOFC—MT)的工作原理分别为:作底层循环的 MCFC 使用燃气轮机的排气作为阴极空气源,而涡轮进口的空气通过燃料电池阳极高温排气中剩余燃料的再燃烧加热,MCFC 工作于常压下,典型的 MCFC—MT 联合循环系统模块图如图 3 所示;MCFC 也可作顶层循环,工作于加压下。作顶层循环的 SOFC 取代燃烧室,其高温排气进入微型燃机涡轮机膨胀做功。SOFC—MT 联合循环发电系统模块图如图 4 所示。

微型燃气轮机—高温燃料电池联合循环系统作为一种分布式发电系统,其商业化产品将会在未来 5~10 年面世,工业燃气轮机—高温燃料电池适用于中心电站式系统,在未来 10 年或更长时间内将无法实现商业化,但其技术在理论上是可行的。尽管中国在这方面的研究才刚刚起步,但不能否认微型燃气轮机—高温燃料电池联合循环系统在中国未来是具有非常大潜能的。可以通过模块化组装,指导中国在联合循环系统上的仿真优化,进一步完善本国的研究系统,以设计出属于中国自己的产品,促进产品商业化

步伐。通过搭建仿真模块,可以分析燃气轮机在轴承、发电机、可靠性和耐用性等方面与燃料电池堆大小改进和匹配;还可以设计 MT—高温燃料电池系统与溴化锂制冷系统组合的模块,理论上可以实现冷热联供,只是系统更为复杂。

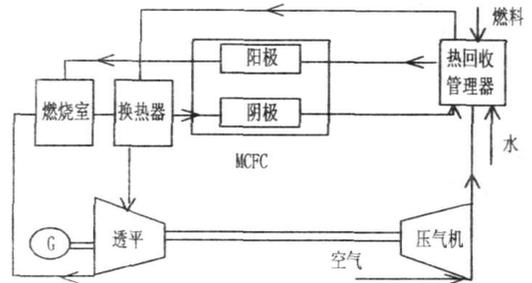


图 3 MCFC—MT 联合循环系统

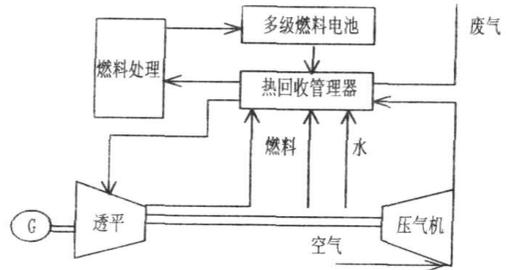


图 4 SOFC—MT 联合循环系统

5 微型燃气轮机的其他应用

先进微型燃气轮机可广泛应用于各种分布式供能系统,还体现在:

(1) 微型燃气轮机与热泵联合循环,利用微型燃气轮机的动力驱动热泵,将余热用于提升热煤温度。以期最大限度利用余热。

(2) 微型燃气轮机太阳能辅助循环系统,利用太阳能补充高日照情况下的制冷需求。

(3) 微型燃气轮机在垃圾掩埋场和偏远地区的应用,有效利用微型燃气轮机的燃料适应性,将生物质气化或石油开采中的伴生气供微型燃机发电。

(4) 微型燃气轮机应用于汽车混合动力系统,作为备用电源和便携式电源。

根据不同场合,不同用户需求,分别设计不同的系统方案,并进行建模仿真与优化设计,以便设计出实用有效的产品满足用户需求。

6 结论

中国在今后相当长一段时间内对能源需求量还很大,要实现能源的可持续发展,达到高效、节能、环保的目的,必须探求合理的能源利用方式。

以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统是一种提供清洁、可靠、高质量电能并实现冷热电联供的新技术,作为集中供电大电网的补充,它对环境安全及经济、能源的可持续发展起着战略意义。

分布式供能系统有多种方案,而中国对分布式供能系统的研究起步较晚,但作为集中供能系统的有益补充,分布式供能系统是中国未来能源系统的一种必然趋势。由于设备昂贵,技术有限,对实体组装进行现场研究是不现实的,所以,借助模块化模型的建立,并在此基础上进行仿真分析就成了进一步研究与优化分布式供能系统的有利手段。

前面以模块化模型的形式较为系统地给出了以

微型燃气轮机为核心的几种主要分布式供能系统,在模块化模型的基础上提出相应结合技术或相关优化方法,旨在为分布式供能系统的仿真优化打下良好的基础。

参考文献

- [1] 杨策,刘宏伟,李晓等.微型燃气轮机技术[J].热能动力工程,2003.
- [2] 黄锦涛,丰镇平,刘莉.微型燃气轮机冷热电联产系统运行模式研究[J].热力发电,2004.
- [3] 冯志兵,金红光.燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J].中国电机工程学报,2006.
- [4] 段立强,徐刚,林汝谋,等.IGCC系统热力与环境性能结合的评价准则[J].中国电机工程学报,2004.
- [5] 翁一虎,翁史烈,苏明.以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统[J].中国电力,2003.
- [6] Omar Othman Badran. Gas turbine performance improvement [J]. Applied Energy, 1999.

(收稿日期:2007-12-22)

(上接第61页)

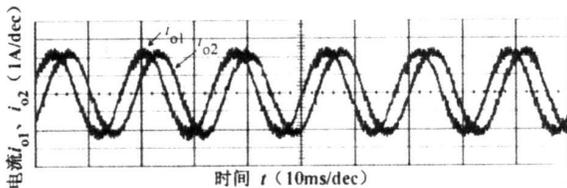


图2 C相缺相故障时输出电流的实验结果(1A/格,10ms/格)

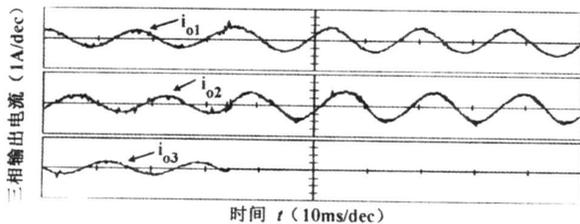


图3 故障发生时的瞬态输出电流波形的实验结果(1A/格,10ms/格)

3 结论

无论哪一相发生故障,均可在数学分析方法的基础上,重新构建的开关函数矩阵,合成新的输出信号,

使MC在缺相情况下仍然可以继续工作,大大减少了因某一相断相时MC停止运行的几率。仿真与实验已经证明该容错方案的可行性,提出的矫正开关函数矩阵策略,可用来提高MC抗故障的鲁棒性。

参考文献

- [1] 王兆安,黄俊.电力电子技术(第4版)[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [2] O. Simon, J. Mahlein, M. N. Muenzer, and M. Bruckmann, "Modern Solutions for Industrial Matrix Converter Applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 2, pp. 401-406, Apr. 2002.
- [3] P. Wheeler, J. Clare, L. Empringham, M. Apap, and M. Bland, "Matrix Converters", Power Engineering Journal, vol. 16, no. 6, pp. 273-282, Dec. 2002.
- [4] T. H. Liu, J. R. Fu, and T. A. Lipo, "A Strategy for Improving Reliability of Field-Oriented Controlled Induction Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, no. 5, pp. 910-918, Sep./Oct. 1993.
- [5] 汤宁平,王建宽,吴汉光.矩阵变换器的SPWM控制技术及其实现[J].电工技术学报,2003(4):25-29.

作者简介:

赵慕银,男,1968年生,硕士,副教授,研究方向:电力电子与电气传动、过程控制。

(收稿日期:2007-12-10)