

System Structure Analysis and Fuzzy Comprehensive of Fuel Cell (SOFC)-Gas Turbine Top Circulation

BaiHui Xu^{1,2}, Jimin Ren², Qianchao Liang²

¹Naval 92089 Base, Ningbo Zhejiang

²College of Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

Email: lqc163cc@163.com

Received: Jul. 1st, 2018; accepted: Jul. 20th, 2018; published: Jul. 27th, 2018

Abstract

This paper introduces four kinds of cyclic structures of the top-level model of fuel cell and gas turbine combined cycle power generation system, puts forward the method of applying fuzzy comprehensive evaluation to analyze the power generation system and judge the advantages and disadvantages of these four circulation modes, and then confirms the positive role of the intercooler, regenerator and supercharger.

Keywords

Top Circulation, Regenerator, Supercharger, Fuzzy Comprehensive Analysis

固体氧化物燃料电池 - 燃气轮机混合动力系统结构分析及性能综合评价

徐百汇^{1,2}, 任济民², 梁前超²

¹92089部队, 浙江 宁波

²海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉

Email: lqc163cc@163.com

收稿日期: 2018年7月1日; 录用日期: 2018年7月20日; 发布日期: 2018年7月27日

摘要

本文介绍了燃料电池与燃气轮机联合循环发电系统顶层模式四种循环结构, 并提出将模糊综合评判方法

文章引用: 徐百汇, 任济民, 梁前超. 固体氧化物燃料电池 - 燃气轮机混合动力系统结构分析及性能综合评价[J]. 动力系统与控制, 2018, 7(3): 239-244. DOI: 10.12677/dsc.2018.73026

应用到分析该发电系统结构的优良。本文创新地采用数学工具即用模糊数学中两级评判法,判断这四种循环模式的优劣,意义在于从理论上肯定了中冷回热器、增压器的积极作用。

关键词

顶层循环系统, 回热器, 增压器, 模糊综合分析

Copyright © 2018 by authors 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. 前言

进入 21 世纪以来,由于能源的紧缺和环保意识的增加,高效率和环境友好型的发电方式成为当今社会的重要研究内容。燃料电池就是一种集高效与环保为一体发电装置。燃料电池是燃料与氧化剂之间通过电子移动来发电的,没有卡诺循环的限制,效率很高,如今燃料电池的燃料多为甲烷或者氢气,燃烧后产物无污染。燃料电池种类很多,有质子交换膜燃料电池(PEMFC)、熔融碳酸盐电池(MCFC)、固体氧化物燃料电池等。其中固体氧化物燃料电池工作温度在 800 摄氏度以上,可以和燃气轮机组成一个混合发电装置,使得发电效率更高[1][2][3]。

模糊综合评判有三个要素:因素集、评语集和单因素判断。模糊综合评判考虑与被评判的事物相关的各个因素,做出合理的综合评价,其基本的思想是模糊线性原理和最大隶属度原则[4][5][6]。本文将燃料电池与燃气轮机的顶层循环系统几种循环模式进行模糊评判,为他人选用循环模式做参考。

2. 燃料电池(SOFC)与燃气轮机混合系统的顶层循环结构

在燃料电池与燃气轮机顶层循环中,高温的固态氧化物燃料电池充当燃气轮机燃烧室的角色,燃料和氧化剂先在燃料电池中发点后,剩余气体再进入燃机中做功。顶层模式的循环结构有很多,我重点介绍以下四种。

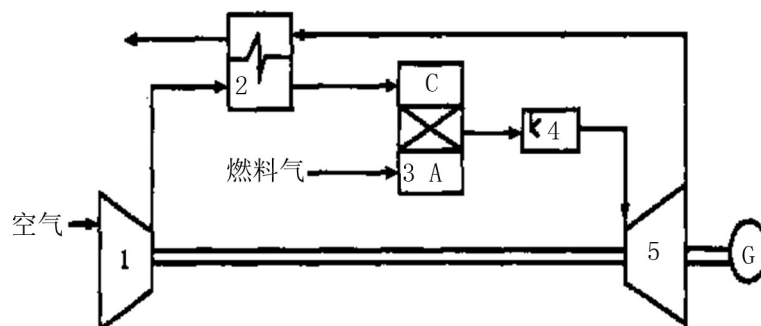
单独使用回热器燃机与 SOFC 的循环结构如图 1 所示。空气进入首先进入压气机升压,之后高压空气进入回热器中预热,在这之后与燃料气在燃料电池发电,残余气体再进行燃烧,使气体温度再次得到提升,随后高温气体在透平中膨胀做功,气体的压力和温度都降低,排出气体的余热被用来在回热器中加热空气。

中冷回热燃机与两级 SOFC 循环结构如图 2 所示[7]。此循环结构包括两个压气机,两个燃料电池和两个透平。空气先进入低压压气机中,经过中冷器进入高压压气机中,出来的高压空气在回热器重加热后进入高压燃料电池中发电,剩余气体在进入高压透平中燃烧,这之后高压透平反映后的残余气体再进入低压的燃料电池与低压透平反应发电。燃料气分成两股送入低压和高压燃料电池中,这种循环结构比前一种复杂也比前一种输出功率高。

增压器气体再循环燃机与 SOFC 循环结构如图 3 所示。燃料气与压气机压缩过的空气在燃料电池中发电。反应后的剩余气体一部分通过增压器再循环,起到对空气预热的作用,另一部分气体进入燃烧室中燃烧,在利用透平做功。

回热器与增压器再循环的燃机与 SOFC 这种循环结构(如图 4)与图 3 的循环结构相比增加了个回热器。燃料电池尾气进入燃烧室和增压器存在气体分配的问题,如果透平入口温度高,则回热器预热效果好,

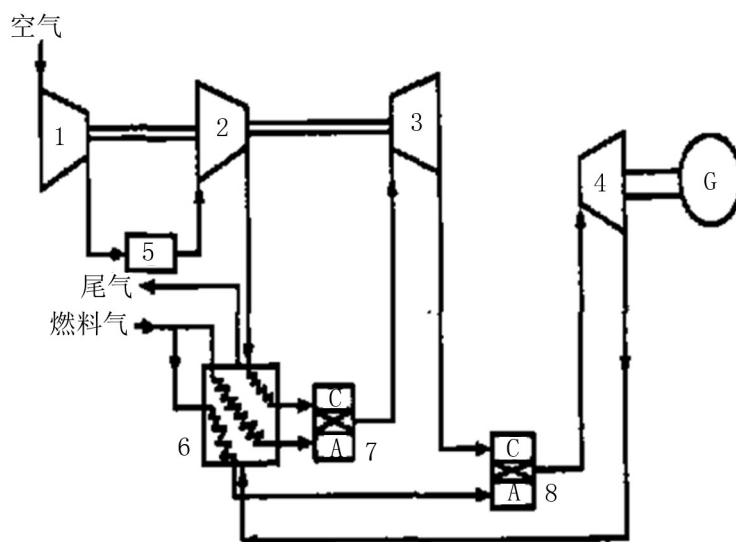
增压器的进气量就会相对减少, 当 SOFC 尾气在循环比例为 20% 时, 系统的效率最高[8]。



1. 压缩机 2. 回热器 3. SOFC 4. 燃烧室 5. 微透平

Figure 1. The gas turbine of used regenerator and SOFC structure

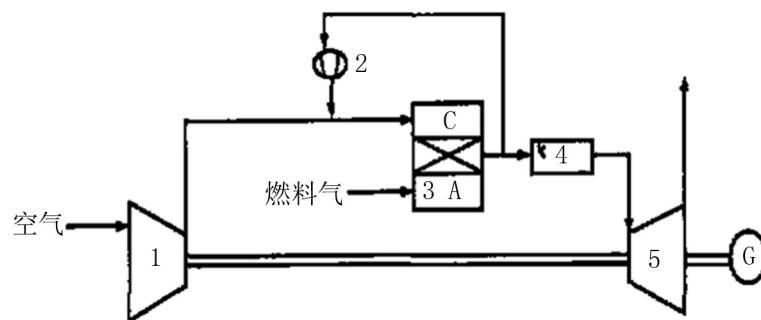
图 1. 单独使用回热器燃机与 SOFC 的循环结构



1. 低压压气机 2. 高压压气机 3. 高压透平 4. 低压透平
5. 中间冷却器 6. 回热器 7. 高压SOFC 8. 低压SOFC

Figure 2. The gas turbine of the intercooler-regenerator and SOFC structure

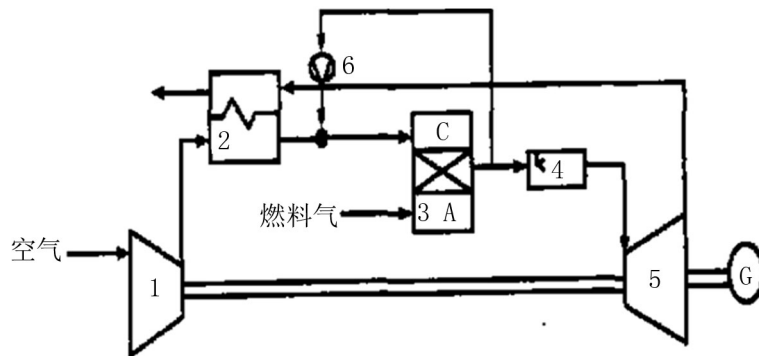
图 2. 中冷回热燃机与两级 SOFC 循环结构



1. 压缩机 2. 增压器 3. SOFC 4. 燃烧室 5. 微透平

Figure 3. The gas turbine of the supercharger and SOFC structure

图 3. 增压器气体再循环燃机与 SOFC 循环结构



1. 压缩机 2. 回热器 3. SOFC 4. 燃烧室 5. 微透平 6. 增压器
Figure 4. The gas turbine of the regenerator-supercharger and SOFC structure
图 4. 回热器与增压器再循环的燃机与 SOFC 循环结构

3. 燃气轮机与燃料电池循环结构的模糊评判模型

在复杂系统中，评判对象的有关影响因素较多时，各因素之间有时还存在不同的层次，不能简单的应用单因素评判得到满意的结果，需要根据评判对象的特点把评判因素分类，逐层进行综合评判，即多层模糊综合评判[9]。多层模糊综合评判模型的具体步骤是：把评判因素集合 U 按属性分成 m 个子集，满足

$$\sum_{i=1}^m U_i = U, \{U_i \cap U_j = \Phi (i \neq j)\}$$

可以得到第二级评判因素集合 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$, $U_i = \{U_{ik}\} (i=1, 2, \dots, m, k=1, 2, \dots, nk)$ 表示子集 U_i 中有 n_k 评判因素。对于每个子集 U_i 中的 n_k 个评判因素，按单层次模糊综合评判模型进行评判，假如 U_i 中的权数分配为 A_i ，对应的评判矩阵为 R_i ，可得第 i 个子集 U_i 的综合评判结果为：

$$B_i = A_i \circ R_i = [b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}]$$

对 U 中的 m 个评判因素子集 U_i 进行综合评判，决策矩阵为：

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix}$$

二层模糊综合评判示意图如图 5 所示。

如果 U 中的各因子子集权数分配为 A ，评判结果为 $B = A \circ R$ 。

类似地，可以构造三层、四层等多层次模糊综合评判。

综上所述： (U, V, R) 构成一个模糊综合评价的数学模型，这其中的模糊变换 R 把 U 上的模糊子集 U_i 变到 V 上的一个模糊子集 B ，则 B 就是对评价对象所作的一个模糊综合评价。这就是燃气轮机与燃料电池循环结构的模糊评判模型构成[10]。

4. 系统循环结构模糊评判的应用实例

如今石油资源的日益减少，能够进行余热利用的回热器成为人们的重点发展对象。燃气轮机只有压气机，燃烧室和透平工作的简单循环的热效率还不到 30%，透平的出口温度可以被回热器有效的利用起来，进行压缩空气的预热，可以有效的增加燃气轮机的热效率。由于回热器是利用出口的残余气体的热量来加热压缩空气，属于气体与气体之间的热交换，换热系数较小，为了保证良好的加热效果，需要有

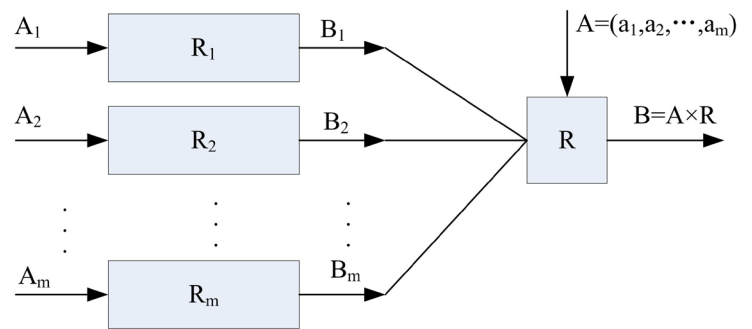


Figure 5. The graphical symbol of two layer-fuzzy judgment
图 5. 二层模糊综合评判示意图

很大的热交换面积，所以回热器的体积一般都比较大。

中冷器能显著提高循环的比功率，但是对于效率的提高却起不到作用，一般情况下都是中冷回热器混合使用，这时才能即提高循环的比功，也提高循环的热效率。

增压器有很多种类，常见的增压器由涡轮和离心压气机组成，燃料电池的尾气在增压器中燃烧，做功，带动离心式压气机压缩空气，使空气密度大大增加。在单位体积里，气体质量大大增加，进气量即可满足燃料的燃烧要求，达到提高功率的目的。

为了定量评定上述循环的优劣，我们采用联合研究方式，工程师与院校教授联合起来，制定这几种顶层循环模式的评估模型，并进行计算机分析与计算。具体做法是：邀请多位专家(其中有院校教授、副教授、高级工程师、中级工程师)，共同对上述循环模式的性能从各方面进行打分评价，最后采用计算机数据统计、矩阵运算方程得出量化评价指标，从而定量地评价上述四种循环的优劣。只要将专家评价表输入计算机，即可对评价指标做出评价。

顶层循环模式性能评价的四个一级指标：1) 经济效益；2) 占用体积；3) 寿命；4) 效率。专家评估系统是通过众多专家对循环性能的个人评判，通过打分后输入计算机，得出评价指标，判断我部技术保障能力的定量指标，从而为科学决策提供依据。系统要求参加评判的专家人数越多越好，我们选定的院校专家和工程师分别进行打分评判，分为四大组，各人的权重系数也不一样。

第一组(E1~E3)：院校教授 3 人；

第二组(E4~E8)：院校副教授 5 人；

第三组(E9~E11)：高级工程师 3；

第四组(E12~E16)：中级工程师 5 人；

共十四人分为四组打分，其各人权重为：

$$E = \{E1, E2, E3, \dots, E16\}$$

$$= \{0.090, 0.090, 0.090, 0.066, 0.066, 0.066, 0.066, 0.066, 0.060, 0.060, 0.060, 0.044, 0.044, 0.044, 0.044\}$$

由前面的评判指标，我们建立评判因素集如下：

$$u = \{u1, u2, u3, u4\} = \{\text{经济效益, 占用体积, 寿命, 效率}\}$$

对应的权重集为：

$$A = \{A1, A2, A3, A4\} = \{0.23, 0.15, 0.11, 0.51\}$$

建立评语集

$$V = \{V1, V2, V3, V4\}$$

其中: $V1$ 优秀, $V2$ 良好, $V3$ 合格, $V4$ 不合格。

做出一级评判结果:

$$B1 = A1 \cdot R1 = \{0.16, 0.25, 0.23, 0.27\}$$

$$B2 = A2 \cdot R2 = \{0.28, 0.24, 0.23, 0.23\}$$

$$B3 = A3 \cdot R3 = \{0.20, 0.36, 0.39, 0.18\}$$

$$B4 = A4 \cdot R4 = \{0.36, 0.31, 0.21, 0.12\}$$

一级因素进行综合评判: $B = AI * RI$

评价对象的模糊综合评价值:

$$Z = B \times F = (0.484, 0.249, 0.161, 0.106) \times (90, 75, 60, 50) = 77.195$$

根据最大隶属度原则[7], $V = \{V1, V2, V3, V4\}$ 由上面计算可知单独使用回热器燃机与 SOFC 的循环结构评价为“良好”, 中冷回热燃机与两级 SOFC 循环结构评价为“优秀”。增压器气体再循环燃机与 SOFC 循环结构评价为“合格”, 回热器与增压器再循环的燃机与 SOFC 循环结构评价为“比较优秀”。如果透平入口温度高, 则回热器预热效果好, 增压器的进气量就会相对减少, 当 SOFC 尾气在循环比例为 20%时, 系统的效率最高。

5. 结论

本文提出将模糊综合评判应用在该发电系统的优良分析的方法。利用模糊数学中综合评判的方法, 判断这四种循环模式的优劣, 从而肯定了中冷回热器、增压器的积极作用。由评价结果可知, 中冷器、回热器和增压器的安装对高温燃料电池与燃气轮机混合发电系统有着积极的意义。中冷回热燃机与两级 SOFC 循环的结构比回热器 - 增压器燃机与 SOFC 循环的结构综合评价性能更好。

基金项目

国防科技创新特区项目(17-163-13-ZT-008-033-01)。

参考文献

- [1] 冯登满, 刘畅, 杨苗苗, 等. 固体氧化物燃料电池的发展与研究[J]. 科技展望, 2016(5): 60.
- [2] 耿孝儒, 吕小静, 翁一武. 基于生物质气的固体氧化物燃料电池 - 燃气轮机混合动力系统的性能分析[J]. 动力工程学报, 2015, 35(2): 166-172.
- [3] 李杨, 翁一武. 固体氧化物燃料电池 - 燃气轮机混合动力系统及控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(35): 94-100.
- [4] 黄刘松. 固体氧化物燃料电池 - 微型燃气轮机混合发电装置建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [5] Tian, Y. (2002) Modeling of Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid Power Plant. Nanyang Technological University, Singapore.
- [6] George, R.A. (2000) Status of Tubular SOFC Field Unit Demonstrations. *Journal of Power Sources*, **86**, 134-139.
- [7] 张化光, 邓玮, 耿加民. 发电用燃气轮机的非线性数学建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 108-114.
- [8] 李政, 王德慧, 薛亚丽, 等. 微型燃气轮机的建模研究(I)-动态特性分析[J]. 中国动力工程学报, 2005, 25(1): 13-17.
- [9] 李政, 王德慧, 薛亚丽, 等. 微型燃气轮机的建模研究——简化与分析[J]. 中国动力工程学报, 2005, 25(2): 160-164.
- [10] 丁毅, 黄向华, 张天宏. 基于相似理论的燃气轮机建模技术研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 589-694.

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：2325-677X，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：dsc@hanspub.org