

doi: 10.7690/bgzdh.2020.07.005

燃料电池在分布式能源中的应用技术

张 鸿, 吴 航, 张 聪

(中国兵器装备集团自动化研究所特种产品事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高以燃料电池为主电源的分布式能源系统的普适性, 研制一种以燃料电池为主电源、蓄电池为辅, 可集成风、光等电能技术的分布式能源系统。根据燃料电池的特性, 提出蓄电池容量阈值控制策略、蓄电池的充放电电流控制策略, 采用模糊 PID 均衡算法设计实现燃料电池的平稳性自动控制、功率自动负载跟踪。基于提出的控制策略, 开发一套 4 kW 分布式能源发电系统。结果表明, 该控制策略实用、有效。

关键词: 燃料电池; 发电技术; 分布式能源; 新能源; 负载追踪

中图分类号: TP272 **文献标志码:** A

Application Technology of Fuel Cell in Distributed Energy

Zhang Hong, Wu Hang, Zhang Cong

*(Department of Special Product, Automation Research Institute Co., Ltd. of
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)*

Abstract: In order to improve the universality of the distributed energy system with fuel cells as the main power supply, a distributed energy system with fuel cells as the main power supply, batteries as auxiliary sources, which can integrate wind and light energy, has been developed. According to the characteristics of the fuel cell, the battery capacity threshold control strategy, the battery charge and discharge current control strategy are proposed. The fuzzy PID equalization algorithm is used to design the automatic control of the fuel cell's stability and automatic power load track. Based on the proposed control strategy, a set of 4 kW distributed energy power generation system was developed. The results show that the control strategy is practical and effective.

Keywords: fuel cell; power generation technology; distributed energy; new energy; load tracking

0 引言

分布式能源系统是直接面向负载侧的能源系统, 主要用于解决自然灾害较多引起公用电网停电, 或较偏远无电网地区的电力需求问题。目前常见的分布式供电系统有柴油发电机、光伏电站和蓄电池等。柴油发电机存在工作噪声大、有害排放等缺点; 光伏电站对安装地点要求较高, 易造成林地、耕地的损害; 而蓄电池则存在体积大、对环境温度要求苛刻等缺点。鉴于以上各种能源的不足, 清洁、环保、高效的新型分布式能源系统正引起业界的高度关注^[1]。

燃料电池作为继水力、火力和核能发电之后的第四类发电技术, 是一种不经燃烧, 直接以电化学反应方式将燃料和氧化剂的化学能转变为电能的静默式高效发电装置, 其不受卡诺循环限制, 具有清洁、无污染、噪声低、能量密度高、连续供电时间长等优点, 且输出为直流电, 更适用于匹配蓄电池组成分布式能源系统进行工作。燃料电池化学反应

存在输出特性软、动态响应慢等不足。为克服以上不足和提高普适性, 笔者提出一种以燃料电池为主, 蓄电池为辅的分布式能源系统。该系统通过监测蓄电池荷电状态(state of charge, SOC)、充放电电流等, 实现对负载功率的跟踪和燃料电池功率的动态调整, 解决燃料电池功率变化的滞后性及功率补偿过程中功率剧烈波动问题。根据以上控制方法, 笔者研制了一套样机。另外, 为降低其工作度电成本, 采用多级电压阈值策略, 实现光伏等低成本能源优先供电模式, 提升系统的商业化价值。测试结果表明, 提出的控制策略实现了燃料电池对负载的自动跟踪补偿及燃料电池功率波动的平稳性。

1 分布式能源系统

1.1 系统的组成设计

分布式能源系统主要由燃料电池、储能单元(含蓄电池及 BMS)、控制单元(含电源变换)、燃料供给单元及其他能源(如光伏、风能)等组合而成。燃料电池发电是一个放热化学反应, 其释放出的热量

收稿日期: 2020-04-16; 修回日期: 2020-06-17

作者简介: 张 鸿(1988—), 男, 四川人, 本科, 从事燃料电池研究。E-mail: 695232771@qq.com。

可通过一个换热单元进行回收再利用。各单元之间的关系如图 1 所示。

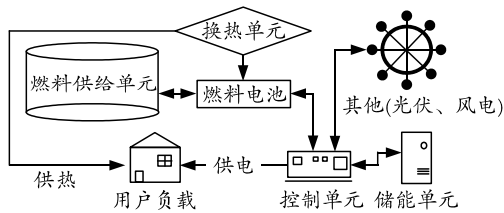


图 1 系统组成

1.2 燃料电池

燃料电池通过化学反应将氢源中的化学能直接转换为电能，能量转换效率高，生成物为纯净的水（含热），是目前最为理想的能源技术。氢源来源广泛，为避免纯氢的储存、运输危险性，常采用重整制氢等技术从甲醇等含氢原料中按需制取，直接进入燃料电池，无中间转运环节，实现安全发电^[2]。

2 应用控制技术

2.1 工作原理

在工作中，分布式能源系统实时监测储能单元的蓄电池状态参数，系统控制单元根据蓄电池的 SOC、充放电电流来控制燃料电池功率补偿度。

首先，根据选用的燃料电池特性，设定其最优工作状态下允许燃料和氧化剂的变化量，在功率补偿过程中，引导燃料电池功率的递增或减小。

其次，针对设计允许的分布式能源系统的最大带载能力，对蓄电池的 SOC 进行判定设置，要求其允许的放电深度循环内，燃料电池的功率补偿能力大于负载的功率。系统主要控制框图见图 2 所示。

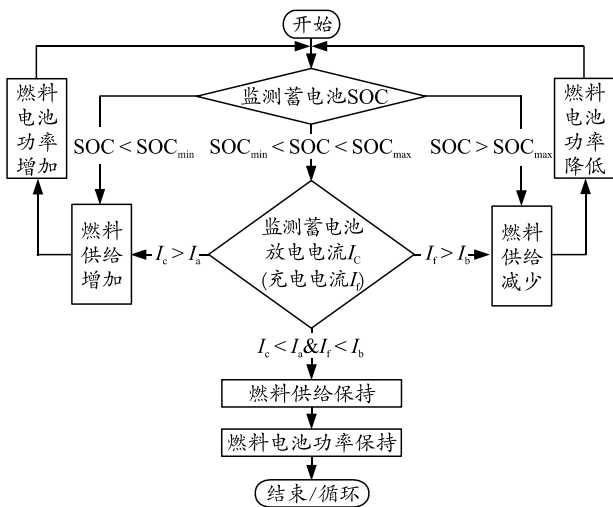


图 2 分布式能源系统控制框图

2.2 控制参数的设定

由于燃料电池的化学发电特性，为实现对分布

式能源系统中各组成单元的自动化控制，须对储能单元中蓄电池的荷电状态 SOC 及充电电流 I_c 、放电电流 I_f 进行实时监测，并反馈控制燃料电池的燃料供给，进行燃料电池的功率调节，实现动态补偿。进一步设定储能单元参数如下：

根据蓄电池性能指标设定其优选放电循环上下限阈值 SOC_{min} 和 SOC_{max} ^[3]，额定发电功率为 $P_{额}$ ，燃料电池额定输出功率为 P ，燃料电池从待机（零负载状态）到实现 $P=P_{额}$ 用时为 t ，蓄电池的总容量为 X ^[4]，则有：

$$X * (SOC_{max} - SOC_{min}) \geq \sum_{i=1}^n P_i t_i ; \quad (1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n t_i . \quad (2)$$

式中： P_i 为燃料电池发电样本功率，其中 P_1 为额定功率； P_n 为零负载待机功率； t_i 为样本功率持续时间，值越小，所得 SOC 阈值越准确； n 为样本量。

在针对燃料电池发电系统的储能蓄电池选型及确定荷电 SOC 阈值的基础上，将可稳定运行的燃料电池系统升、降功率与时间的过程视为线性关系，可以有效简化参数设定，则有

$$X * (SOC_{max} - SOC_{min}) \geq \frac{P_1 - P_n}{2} t . \quad (3)$$

2.3 系统控制策略

2.3.1 蓄电池容量阈值控制策略

在工作中，分布式能源系统控制单元实时监测储能单元反馈的蓄电池 SOC 数据，并根据设置的蓄电池 SOC 上限值 SOC_{max} 和下限值 SOC_{min} ，控制是否增加或减少燃料电池的燃料供给，进一步增加或降低燃料电池的输出功率。其控制策略为：当 $SOC < SOC_{min}$ ，增加燃料供给；当 $SOC > SOC_{max}$ ，减少燃料供给；当 $SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$ ，则保持燃料供给。

2.3.2 蓄电池充放电电流控制策略

由于燃料电池响应的滞后性，通过控制单元实时监测蓄电池充放电电流，并设定允许电流波动值 I 。当充电电流 I_c 或放电电流 I_f 在允许波动范围内时，保持燃料供给，即燃料电池输出功率不变；当充放电电流超出设计允许波动值，则主动进行燃料电池功率的预见性调整，其控制策略如下：当 $I_f > I$ ，增加燃料供给；当 $I_c > I$ ，减少燃料供给；当 $I_f \leq I$ 且 $I_c \leq I$ ，则保持燃料供给。

2.3.3 模糊 PID 均衡算法设计

根据 2.3.1 和 2.3.2 控制策略, 可用模糊 PID 均衡算法设计蓄电池总体控制。如图 3 所示, 通过 PID 均衡算法调节 MOS 的占空比来控制燃料供给, 以达到蓄电池“削峰填谷”的作用。

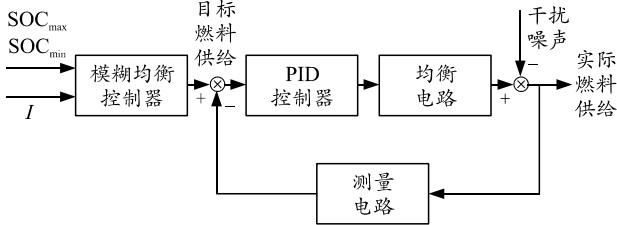


图 3 模糊 PID 均衡控制器原理

根据设定的蓄电池 SOC 上限值 SOC_{max} 、下限值 SOC_{min} 以及电路允许波动值 I , 划定模糊集:

1) 蓄电池 SOC 采用 3 个模糊变量, 其模糊集为 $\{S, M, B\}$, 分别代表 $SOC < SOC_{min}$, $SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$, $SOC > SOC_{max}$;

2) 电流情况 I_{io} 采用 3 个模糊变量, 模糊集为 $\{X, Y, Z\}$, 分别代表 $I_f > I$, $I_f \leq I$ 且 $I_c \leq I$, $I_c > I$;

3) 燃料供给 F_{eq} 采用 5 个模糊变量, 其模糊集为 $\{VS, S, M, B, VB\}$, 分别代表燃料供给程度的很小、小、中等、大、很大。

确认输入变量、输出变量的隶属度函数, 根据 2 种策略的优先级关系可以得出以下控制规则:

1) 当 $SOC < SOC_{min}$ 、 $I_f > I$, 较大增加燃料供给; 其余情况当 $SOC < SOC_{min}$, 均增加燃料供给。

2) 当 $SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$ 时, $I_f > I$, 增加燃料供给; $I_f \leq I$ 且 $I_c \leq I$ 保持燃料供给; $I_c > I$, 减少燃料供给。

3) 当 $SOC > SOC_{max}$ 、 $I_c > I$, 较大减少燃料供给; 其余情况当 $SOC > SOC_{max}$, 减少燃料供给。

采用“IF A then B”的形式进行描述, 其具体表达式如下:

Rule1: IF(SOC is S)and(I_{io} is X) then (F_{eq} is VB);

Rule2: IF(SOC is S)and(I_{io} is Y) then (F_{eq} is B);

Rule3: IF(SOC is S)and(I_{io} is Z) then (F_{eq} is B);

.....

Rule9: IF(SOC is B)and(I_{io} is Z) then (F_{eq} is VS).

模糊 PID 均衡控制器控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊 PID 均衡控制器控制规则

F_{eq}		SOC		
		S	M	B
I_{io}	X	VB	B	S
	Y	B	M	S
	Z	B	S	VS

设定模糊算法中单条规则用 $\chi^0(F_{eq})$ 表示, 将以上单条规则进行融合, 得出模糊算法总规则表达式为:

$$\chi(F_{eq}) = \sum_{n=1}^9 \chi^0(F_{eq}) \quad (4)$$

对该规则进行去模糊化处理:

$$F_{eq} = \frac{\int F_{eq} \chi(F_{eq}) dF_{eq}}{\int \chi(F_{eq}) dF_{eq}} = \frac{\sum_{n=1}^9 d_n \int \chi^0(F_{eq}) dF_{eq}}{\sum_{n=1}^9 \int \chi^0(F_{eq}) dF_{eq}} \quad (5)$$

式中 d_n 表示 $\chi(F_{eq})$ 重心。

3 测试与分析

根据文中所提的分布式能源系统组成及控制策略, 笔者研制了一套 4 kW 分布式能源系统测试样机。燃料电池额定输出功率为 4 kW, 输出电压通过稳压隔离电源设定为 54 V, 储能单元为带 BMS 管理可通信的 48V100Ah 标准锂电池模块, 最大输出功率为 5 kW, 设定其 $SOC_{min}=70%$, $SOC_{max}=85%$, 设定允许的充放电电流波动值 $I=3$ A。

3.1 蓄电池 SOC 阈值测试

利用 6 kW 直流电子负载接入研制的系统搭建实验测试平台, 将蓄电池的 SOC 调整到 60%, 关闭外部负载, 对研制的系统进行工作测试, 直到燃料电池再次进入待机(零负载)模式, 通过控制单元采集到燃料电池的功率数据拟合曲线如图 4 所示。

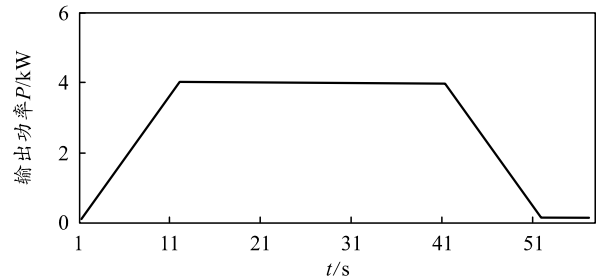


图 4 燃料电池输出功率

如图所示, 系统进入工作模式后, 监测蓄电池容量少于 SOC_{min} , 燃料电池逐步增加功率直到最大输出功率后保持, 持续到蓄电池容量大于 SOC_{max} 后, 燃料电池减少功率输出, 并进入待机模式。

3.2 蓄电池充放电电流阈值测试

将 3.1 节中的测试样机平台接入电子负载, 并设定为恒功率模式, 将蓄电池容量调整到 70%, 启动系统进行测试, 同时执行蓄电池容量阈值控制策略及蓄电池的充放电电流控制策略, 并监测燃料电

池的功率输出曲线及蓄电池容量曲线如图 5 所示。

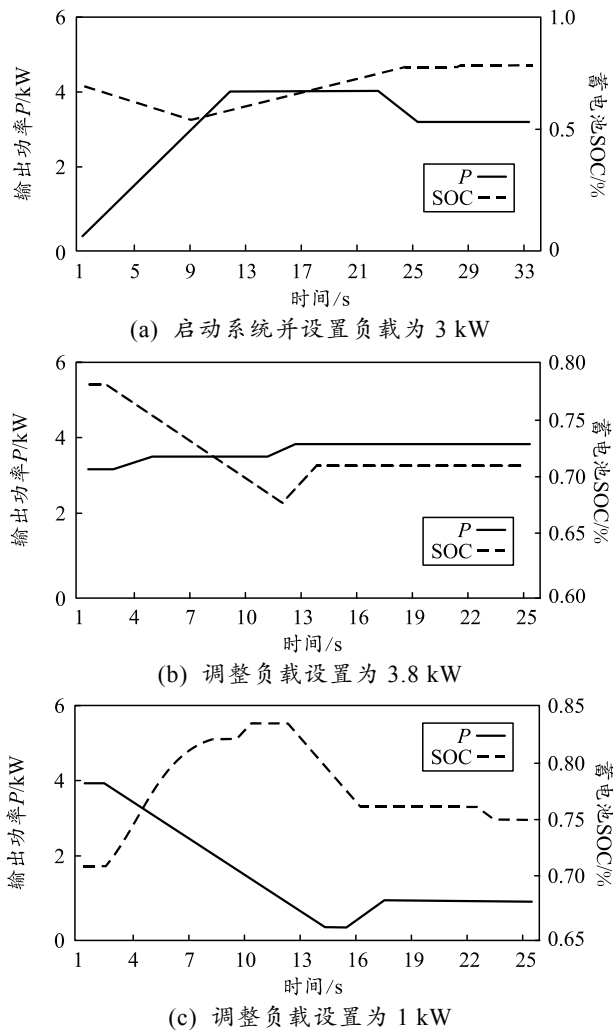


图 5 燃料电池输出功率及蓄电池 SOC 曲线

图 5(a)为系统启动时,监测到储能单元反馈蓄电池 $SOC < SOC_{min}$,控制单元增加燃料电池输出功率,持续到 $SOC = SOC_{min}$,并监测充电电流 $I_c > I$,开始降低燃料电池的功率输出,完成对负载的自动

匹配。然后模拟负载变化,分别将电子负载功率突然增加到 3.8 kW 和降到 1 kW 进行测试,其结果如图 5(b)和(c)所示。蓄电池 SOC 在设定阈值间,由于负载的突变引起蓄电池充、放电电流超过了允许波动值 I ,控制单元立即对燃料电池的功率进行调整,并逐步趋于平衡,实现了负载的自动化跟踪匹配。

经过实验验证:研制的新型分布式能源系统各工作模式工作正常,该控制策略完全满足分布式能源系统对不同负载、负载变化的适应性。

4 结束语

文中分布式能源系统以储能单元各参数的实时监测进行策略控制,采用模糊 PID 算法设计,避免了储能单元过充、过放现象,有效解决了储能模块容量满时出现的规律性充放电功率冲击问题,避免出现燃料电池的功率大幅急变,延长其工作寿命,有效优化燃料电池的连续工作时间,降低故障发生率^[5]。进一步有效地降低了燃料电池的运行成本,提升以燃料电池为主供电的分布式能源系统商业价值。

参考文献:

- [1] 李月. 分布式能源的应用和发展[J]. 经济技术协作信息, 2017(6): 73.
- [2] 杨莉婷, 冯立纲, 张久俊. 浅析燃料电池[J]. 自然杂志, 2017(4): 251-253.
- [3] 陈春飞. 一种锂离子电池组充放电管理方式的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 11.
- [4] ELISÂNGELA M L, LUIS A B, AMAURI M L J. Technical analysis of a hybrid solid oxide fuel cell/gas turbine cycle[J]. Elsevier Ltd, 2019(6): 11.
- [5] 刘健, 万成安, 郭帅. 一种空间燃料电池电源系统设计与实现[J]. 中国空间科学技术, 202040(1): 70-77.