

Progress of Cogeneration System Based on Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Weiguo Li

1. National Engineering Research Center for Large Coal gasification and Coal-based New Materials, Jinan, Shandong, 250000, China
2. Energy Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

The proton exchange membrane fuel cell-driven cogeneration system uses the waste heat generated in the power generation process to provide heat, improve energy efficiency, and promote the green transformation of thermoelectric supply. Article comprehensively reviews the model building technology, operation mode selection, management strategy, evaluation means and of the latest research results in the field of system optimization, and put forward the future research direction may involve multi-level comprehensive modeling, improve system configuration details and enhance integration scheme, predict energy consumption and promote intelligent operation, the implementation of multiple system evaluation and strengthen energy saving and consumption reduction measures, etc.

Keywords

proton exchange membrane; fuel cell; combined heat and power system

基于质子交换膜燃料电池的热电联产系统的研究进展

李维国

1. 大型煤气化及煤基新材料国家工程研究中心, 中国·山东 济南 250000
2. 山东能源集团有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要

质子交换膜燃料电池驱动的热电联产体系利用发电过程中产生的废热来提供热量,提升能源效率,促进热电供应的绿色转型。该文详细阐述这种基于质子交换膜燃料电池的热电联产系统的运作机制,分析各组件结构及其作用。论文全面回顾了模型构建技术、运行模式选择、管理策略、评估手段以及系统优化等领域的最新研究成果,并提出未来的研究方向可能涉及多层次综合建模、改进系统配置细节和增强集成方案、预测能源消耗及推进智能运行、实施多元系统评估以及强化节能降耗措施等领域。

关键词

质子交换膜; 燃料电池; 热电联产系统

1 引言

在全球人口激增和科技进步的驱动下,现代社会对能源的需求呈现前所未有的增长态势。化石燃料储备的日益枯竭与环境压力的加剧,促使全球能源结构向着绿色可持续的方向进行根本转型。各国政府纷纷出台策略,推动在电力生产、交通、供暖及空调等领域广泛应用可再生能源技术,旨在平衡电力供需,促进低碳经济。

2 PEMFC-CHPs

图1展示PEMFC-CHPs的工作流程示意图,该系统的核心组件包括燃料准备单元(重整器)、PEMFC电堆及一

系列辅助设备。重整器作为自热装置,其能源来源于天然气或液化丙烷,通过高效处理,混合气体(富含氢、氮、二氧化碳、一氧化碳以及微量残留燃料)进入PEMFC电堆的阳极,这部分过程在图中的电池堆左侧由红色箭头标记^[1]。与此同时,阴极产生的废弃气体通过催化燃烧回收能量。洁净的空气则从图中电池堆左侧的绿色箭头路径输送到阴极,废气在此经过被动式湿度调节和预热。

PEMFC电堆生成的电力经由电力电子设备精细调控,既满足内部设备如电磁阀、风扇和加湿器的需求,也对外输出电力。电堆产生的多余热量通过循环冷却水回收,并进一步在换热器中交换,驱动下游的热水供应系统。如有必要,通过散热器可以精确控制系统的温度。在整个过程中,系统致力于最大限度地回收水分,以体现其节水设计理念。

【作者简介】李维国(1984-),男,中国山东菏泽人,硕士,高级工程师,从事燃料电池发电、电解水制氢研究。

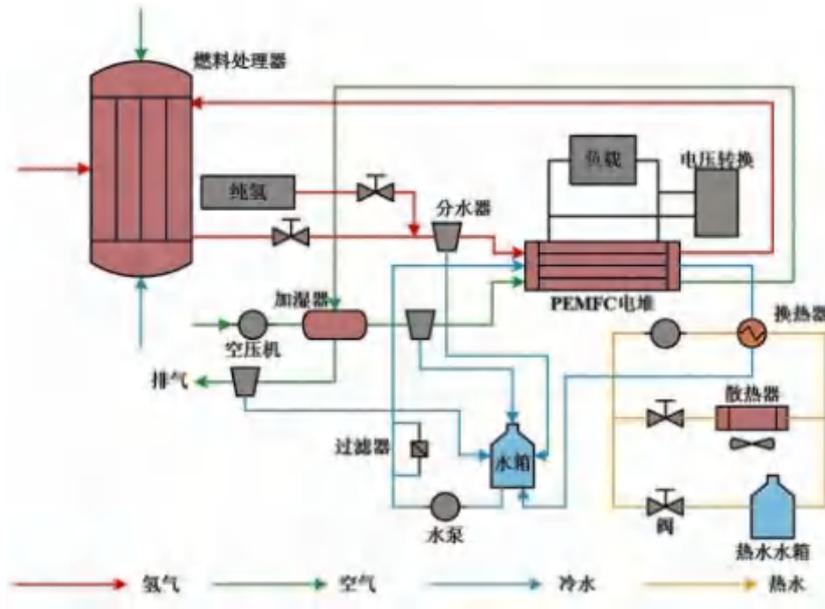


图 1 PEMFC-CHPs 图

3 PEMFC-CHPs 研究进展

3.1 建立 PEMFC-CHPs 模型

初始阶段，包括设定恒定和变量，执行初始化程序。然后逐步构建子系统模型并整合各个组件，接着通过可靠的数据源对整个系统模型进行实证验证。在操作过程中，用户可以根据现有资料 and 实际运行条件对系统进行个性化校准和微调。

CHP 的发电效率、热效率以及火用效率，作为性能评价的关键指标，研究者运用数学优化、动力学模拟以及建筑模拟技术，借助于定制的 Matlab/Simulink 编程环境，或是商业软件如 HYSYS、Labview 和 AspenPlus，构建系统静态模型以分析稳定性，动态模型则聚焦于实时监控、故障诊断和控制策略的优化。

目前针对 PEMFC-CHPs 的建模研究，已经涵盖模型的不同类型以及系统架构和效能的综合评估。静态模型在参数优化和设计决策中发挥重要作用，然而，为真实反映系统在实际操作中的动态行为，动态模型显得更为关键。

随着 PEMFC-CHPs 系统的规模扩展和集成度提升，其模型也随之变得更为精细且多功能，如今此系统已发展为一个高度集成的平台，集成氢气生产、电力生成、供暖、冷却、能源循环利用以及各类辅助设备，旨在实现高效能运作^[2]。

3.2 PEMFC-CHPs 技术的应用

为优化和扩展能源利用效率，研究人员积极探索将 PEMFC (碱性燃料电池) 与其他先进技术如热泵、制冷、储能、热能回收、生物制氢等相结合。这种融合旨在提升 PEMFCs 的性能，同时最大化利用其工作过程中的废热，确保系统内的热量得到全面利用，并通过太阳能和风能等可再生能源补

充 CHPs 与用户之间的能量需求。

一种创新的方案是将 HT PEMFC 与沼气重整、水煤气变换和溴化锂吸收式制冷技术组合，构建出分布式能源供应体系。这个系统精确控制电池工作条件，如温度、压力和电极化学平衡，从而实现高效冷热电三联供 (CCHP)，在住宅应用中表现出色。研究还展示集成热回收功能的 PEMFC-CHPs 技术，其最大效率已逼近 82%，展现前所未有的能源利用效率。

3.3 PEMFC-CHPs 的操作模式与运行策略

系统操作模式的划分依据用户所在地的电网规定和经济效益考量，主要分为自主与联网两种形态。自主运行模式的优势在于其独立于电网，确保不间断供电，消除了配电网的损耗，节约能源。然而，这需要实施严格的电力负荷管理，并且灵活性有所欠缺，对系统规模和容量有较高的要求。当 PEMFC-CHPs 并入电网后，可能会面临电压波动和频率不协调的问题，此时，通过调控微电网稳定性以维持供需平衡至关重要，以减轻其对电力系统的冲击。

最常见的运行策略是满负荷运行，但可能导致能源的过度消耗，多余的电力输送到电网，形成环境负担。因此，选择的运行方式应与关注的系统效能指标紧密相连。当采用电跟随策略，剩余热量可通过储能设备储存起来，当热能输出与用户需求同步时，燃料消耗显著减少。对于没有附加辅助热源的并网 PEMFC-CHPs，热跟随策略更为适宜，其能在满足用户热需求的前提下，灵活地从电网获取或释放电力。

混合运行策略则是电跟随和热跟随策略的结合，兼备两者优点。例如，在冬季高热需求期间，系统切换至热跟随模式以保证供暖，而非供暖季，可转为电跟随策略以提高效率。不同操作模式和运行策略的具体对比见表 1。

表 1 PEMFC-CHPs 操作模式与运行策略详细对比

运行模式	独立运行	联网运行		
策略	电跟随策略	电跟随策略	热跟随策略	混合策略
是否需辅热	必须	可选择		可选择
优点	实现零输电和输电损失, 独立供电	简化系统结构, 降低资本费用, 提高工作的有效性和灵活性		提高性能和效率, 灵活操作
缺陷	要求更严格的选项和大小, 要求大的系统, 高的投资费用	电网互动频率高, 输配电损耗大, 电价政策的依赖性, 对电力均衡设备的需求 (如燃料电池微网)		需要大量的操作参数

探究运营策略对 CHPs 热电效率和燃料消耗的效应, 提议当热电功率比低于 1.75 时采取热导向策略, 而 1.75~2.5 的范围内推荐运用电导向策略。通过 MATLAB/Simulink 构建家用 PEMFC-CHPs 模型, 鉴于 PEMFC 堆栈的水冷却特性会受到用户热水温度的直接影响, 设计一个以满足热能需求为导向的操作模式。该模式基于用户的全天热需求, 评估系统在变化负荷下的动态表现, 并计算净电产出。结果显示, 此策略有效满足热能需求, 同时也能部分供应电力, 降低能耗。

后续研究提出一种结合锂离子电池储能的 PEMFC-CHPs 系统, 根据不同季节的实际负荷进行全天仿真, 锂离子电池用于补偿热导向策略下额外的电力需求。仿真显示, 该系统在冬季和夏季的能源利用率分别为 81.24% 和 69.95%, 能分别节省 14.47% 和 7.9% 的氢气。此外, 该系统在保障用户负荷需求和具备良好动态响应的同时, 也展现出显著的经济效益。

综合运营策略旨在优化系统运行并最大化成本效益。通过比较系统成本和性能, 电导向策略与综合策略的影响得以揭示, 能源成本在很大程度上取决于热负荷 (总负荷固定)。虽然在 CHPs 中应用综合策略并未显著降低能源成本, 但其性能优于电导向策略, 且在系统全生命周期内减少排放。

3.4 PEMFC-CHPs 的多维度评价

评价一个系统的全面性能往往依赖于多元化的指标体系, 其以数据的形式清晰地揭示了优劣。PEMFC-CHPs 的评估通常涉及环境、经济效益和热力学等多个维度。环境评估是能源系统的核心环节, 其通过量化污染物和有害气体的减排, 将环境问题转化为经济负担, 以此衡量其影响。从热能经济和环境影响的角度深入剖析 CHPs, 此时可设定一个复合目标函数, 包括投资成本、总能耗损失和环境影响成本, 以此评估系统的生产成本, 包括电力和蒸汽成本。经过优化, 与初始条件相比, 系统的平均产品单位成本降低了显著的 $0.56\text{ \$} \cdot \text{GJ}^{-1}$ 。

发电效率是评价的关键指标。对于 PEMFC-CHPs, 研究水分碳比、工作温度和阳极化学计量比等因素对其效率的影响。当这些参数分别调整至 26、160°C 和 1.2 时, 系统的净电功率输出达到峰值。在实际应用中, 除电力, 供热和冷却需求同样重要, 因此, 基于热力学第一定律的火用效率成为更全面的评价标准。

为提升无电网连接的 CHP 设备的灵活性, 引入电池作为储能装置, 同时考虑运行的各种约束, 通过优化运行周期, 成功实现年度最低的电力消耗 (PEC)。然而, 在对 PEMFC-CHPs 进行多目标优化时, 诸如火用效率、能源成本和温室气体减排这样的目标常常相互冲突, 无法同时达到所有优化的顶点^[1]。尽管有研究尝试通过寻找帕累托最优解来平衡这些因素, 但在追求使用效率和减少温室气体排放的过程中, 经济成本往往不可避免地受到影响。

4 未来发展趋势

全方位多层次建模策略。目前的研究主要聚焦于静态状态, 对动态或过渡状态的实时负荷分布探讨不足。未来模型构建应强化高级优化技术, 整合经济因素、实测数据、商业实践及特殊需求。虽然 PEMFC 模型已相当详尽, 但适用于 CHPs 并能融入住宅建筑的 PEMFC-CHPs 模型仍然稀缺。需要更早地关注用户行为模式和能源需求, 当前的 24 小时城市住宅能源模型并不完全适用于乡村地区, 这些地方的生活节奏较慢, 氢气生产和输送存在困难。因此, 未来的科研工作应着重开发适应不同地域、需求、气候和环境的多元化、多层次模型, 并优化 CHPs 的实时控制系统, 以灵活响应家庭的即时电力和热力需求。

5 结语

综上所述, 在质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 热电联产系统的研究领域, 我们已经见证显著的进步与成果。PEMFC 热电联产系统的研究, 不仅是对技术本身的探索, 更是对未来能源利用方式的一种预见与实践。通过高效的能源转换与利用, 该系统将氢气和氧气等再生资源转化为电能和热能, 实现能源的高效利用与零排放, 对于缓解能源危机、保护生态环境具有重要意义。在此, 论文期待与业界同仁共同努力, 继续深化 PEMFC 热电联产系统的研究与应用, 推动绿色、可持续能源的发展。

参考文献

[1] 侯绪凯, 孙荣峰, 耿文广, 等. 基于质子交换膜燃料电池的热电联产系统的研究进展[J]. 化学通报, 2023, 86(12): 1494-1504.
 [2] 张东, 张瑞, 张彬, 等. 基于质子交换膜燃料电池的冷热电联产系统研究进展[J]. 化工进展, 2022(3): 41.
 [3] 古启鑫, 潘剑锋, 张倚. 基于 TRNSYS 的太阳能耦合燃料电池热电联产系统的模拟研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(1): 7.