

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241596

# 基于自适应功率跟踪控制的质子交换膜燃料电池 调频策略研究

马成<sup>1,2</sup>, 李笑竹<sup>1</sup>, 王子祥<sup>1</sup>, 蒋力波<sup>2</sup>, 郑天文<sup>3</sup>

(1. 新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610218; 3. 安徽佑赛科技有限公司, 安徽 芜湖 241100)

**摘要:** 针对质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)采用最大功率点跟踪控制或恒功率控制并网时无法有效支撑电网的问题, 提出一种基于自适应功率跟踪控制的 PEMFC 调频控制策略。首先考虑频率与功率之间的关系, 并计及 PEMFC 的自身特性, 提出一种下垂系数自调节的有功-频率下垂控制方法。其次基于扰动观测法的基本原理提出一种自适应功率跟踪控制算法, 使得 PEMFC 具有动态调节输出功率从而支撑系统频率的能力。最后考虑 PEMFC 的最大功率点特性, 对其运行点进行限制, 避免其运行在浓差极化区从而造成大量能量浪费以及缩短 PEMFC 使用寿命。在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建模型, 验证了所提控制策略的有效性, 结果表明所提控制策略相比于固定下垂系数控制, 其频率波峰值和波谷值分别减少 0.02 Hz 和 0.03 Hz。

**关键词:** 质子交换膜燃料电池; 最大功率点特性; 参数自调节; 下垂控制; 自适应功率跟踪; 一次调频

## Research on frequency regulation strategy of proton exchange membrane fuel cells based on adaptive power tracking control

MA Cheng<sup>1,2</sup>, LI Xiaozhu<sup>1</sup>, WANG Zixiang<sup>1</sup>, JIANG Libo<sup>2</sup>, ZHENG Tianwen<sup>3</sup>

(1. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610218, China; 3. Anhui USEM Technology Co., Ltd., Wuhu 241100, China)

**Abstract:** To address the issue of insufficient grid support when proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) are integrated with the grid using maximum power point tracking (MPPT) or constant power control, this paper proposes a frequency regulation strategy based on adaptive power tracking control for PEMFC. First, considering the relationship between frequency and power as well as the inherent characteristics of PEMFC, a droop-based active power-frequency control method with self-adjusting droop coefficient is proposed. Second, an adaptive power tracking control algorithm is developed based on the principle of disturbance observer, enabling PEMFC to dynamically regulate its output power to support system frequency. Finally, considering the maximum power point characteristic of the PEMFC, its operating point is constrained to avoid operation in the concentration polarization region—this would otherwise lead to significant energy waste and shorten the service life of the PEMFC. A model is built on the MATLAB/Simulink simulation platform to verify the effectiveness of the proposed control strategy. Results show that compared with the fixed droop coefficient control, the proposed control strategy reduces the system's frequency peak value by 0.02 Hz and frequency valley value by 0.03 Hz, respectively.

This work is supported by the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 52307108).

**Key words:** PEMFC; maximum power point characteristic; parameter self-adjustment; droop control; adaptive power tracking; primary frequency regulation

## 0 引言

高比例清洁能源由于自身的波动性, 难以持续、

稳定地提供电力<sup>[1]</sup>, 对电力系统的灵活调节能力提出更高要求。在“双碳”目标与新型电力系统建设的双重压力下, 亟需高效实现多能源形式的相互转化, 充分发挥多类型调节资源的支撑作用。氢储能作为新兴的、清洁无污染的新型储能系统, 具有良好的发展前景<sup>[2-4]</sup>。在氢储能系统运行过程中, 质子交

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目资助(52307108); 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金项目资助(L242008)

换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有响应快、效率高、稳定性好、工作温度低等优点<sup>[5]</sup>,是氢-电的最佳能量转换装置。氢能与电能形成耦合互补,可以为电网提供灵活高效和适应性强的能源<sup>[6-8]</sup>,一方面能够促进可再生能源的广泛利用,另一方面能够保证系统的安全稳定运行。

在氢储能系统中,PEMFC作为核心装置,其运行状态的稳定性直接影响到电网的可靠性和效率。为了实现 PEMFC 与电网的高效协同运行,学者们提出了多种并网控制方法来提高系统的响应能力和稳定性,其中最常见两种方法为恒功率控制(constant power control, CPC)和最大功率点跟踪控制(maximum power point tracking, MPPT)。

PEMFC 采用恒功率控制时,输出功率保持固定,不受负载波动的影响,且控制方法简单,适用于对功率稳定性要求较高的场合。文献[9]采用电流馈电双有源全桥 DC/DC 变换器,实现了 PEMFC 高效、恒定的功率输出;文献[10]对基于 PEMFC 的住宅热电联产系统进行研究,探讨了 PEMFC 不同运行模式下的系统运行特性,研究发现在恒功率模式下热电联产效率更高。然而,恒功率控制存在一定的局限性,特别是在负荷波动较大的情况下,PEMFC 的输出功率可能无法完全适应电网需求的变化,导致效率下降或系统不稳定。同时,该方法忽略了 PEMFC 的动态特性,降低了整体调节的灵活性。最大功率点跟踪控制通过一定的控制算法,例如常用的扰动观测法、电导增量法、固定电压法等,可以实时调节 PEMFC 相关运行参数<sup>[11]</sup>,适用于多种负载条件,并始终以最大功率输出,可在一定程度上弥补恒功率控制的缺陷。随着智能算法的应用,进一步提高了系统的响应速度和功率追踪精度,如文献[12]提出一种基于模型预测的最大功率点跟踪方法,该方法通过对 DC-DC 电压变换器进行控制来调节 PEMFC 的输出电压,以便从系统中提取最大功率;文献[13]提出一种基于沙蚕群算法的最大功率点跟踪方法,在提取 PEMFC 的最大功率方面具有较高的可靠性和效率;文献[14]提出一种改进的有限控制集模型预测控制方法,用于最大功率点跟踪和电压控制;文献[15]提出一种基于自适应粒子群优化算法的最大功率点跟踪方法,无需比例-积分-微分控制(proportional-integral-derivative, PID),避免了跟踪结果依赖 PID 增益的问题。但新型电力系统中多元负荷具有异质性与随机性,上述恒功率与最大功率点跟踪控制方法均难以满足波动性负荷的动态需求,因此也不具备给新型电力系统提供频率支撑的能力。

为解决上述难题,经国内外学者研究发现,PEMFC 具有抑制系统频率波动的能力,如文献[16]表明燃料电池热电联产系统具有长期控制频率波动的潜力;文献[17]基于虚拟同步发电机技术,控制 PEMFC 向系统提供虚拟惯量支撑,提高了系统频率的稳定水平;文献[18]提出一种以燃料电池和风电为主、储能电池为辅的混合储能系统,燃料电池采用基于动态下垂的控制策略,以支撑系统频率;文献[19]建立一种以 PEMFC 为主,光伏、储能电池为辅的电氢耦合系统,其中 PEMFC 采用变系数下垂控制,储能电池采用变系数惯量控制,相比于文献[18],维护系统频率稳定性的效果更加显著。

根据 PEMFC 自身的电化学反应原理,其功率特性曲线可以划分为活化极化区、欧姆极化区以及浓差极化区。当 PEMFC 运行在浓差极化区时,在高电流密度条件下,催化剂层的反应物供应不足,将会导致催化剂层退化、催化剂的活性表面积下降,并且过高的电流密度会导致电极表面过度氧化,造成电极腐蚀,降低电池性能和寿命。然而,上述研究均在 PEMFC 设备全工况范围内进行探讨,并未限制 PEMFC 运行在浓差极化区。

基于上述分析,针对 PEMFC 采用恒功率控制或最大功率点跟踪控制时,现有系统面临负荷波动无法自主调节功率以稳定频率,以及现有 PEMFC 调频模型未限制运行区间可能导致电池损坏的双重问题,本文提出一种基于自适应功率跟踪控制的 PEMFC 调频控制策略,主要贡献如下。

1) 针对 PEMFC 采用恒功率控制或最大功率点跟踪控制时面对负荷波动无法动态调节输出功率以对系统进行频率支撑的问题,基于扰动观测法的原理提出一种自适应功率跟踪控制算法,可以使 PEMFC 根据调节需求动态调节其输出功率从而支撑系统频率。

2) 针对 PEMFC 的一次调频,现有研究尚未充分考虑其工作在浓差极化区的潜在危害,考虑其最大功率点特性,对 PEMFC 的运行状态进行限制,防止其运行在浓差极化区。

3) 根据 PEMFC 自身特性,考虑氢气流速对 PEMFC 输出功率的影响,提出一种变下垂系数的下垂控制方法,相比于固定系数下垂控制,更具有灵活性。

本文在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建模型并验证所提控制策略的有效性。

## 1 PEMFC 并网系统拓扑及控制框架

图 1 为 PEMFC 并网系统综合控制框图。由图

1 可见, 利用下垂控制计算在负荷波动时 PEMFC 所需输出的参考功率, 并将其作为自适应功率跟踪控制算法的输入信号。然后将输入的参考功率信号、PEMFC 实际输出功率信号以及电流信号经过自适应功率跟踪算法的运算, 得到 PEMFC 工作的参考

电流, 并输出 PWM 控制信号。最后利用 PWM 控制使得 PEMFC 输出功率动态地跟随参考功率变化, 实现在负荷波动时对系统进行功率补偿, 从而抑制系统频率波动。

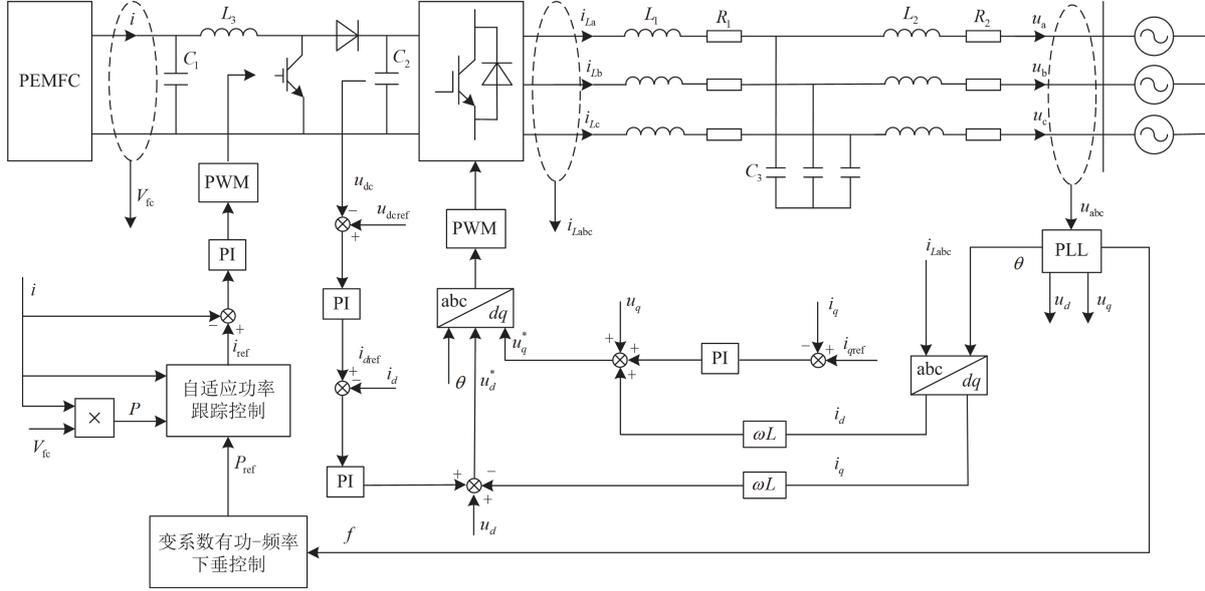


图 1 PEMFC 并网系统综合控制框图

Fig. 1 Comprehensive control block diagram of the PEMFC grid-connected system

## 2 PEMFC 输出特性建模

### 1) PEMFC 输出电压

根据 PEMFC 的电化学反应原理, 其输出电压  $V_{out}$  受开路电压  $E_n$ 、活化极化过电势  $V_{act}$ 、欧姆极化过电势  $V_{ohm}$  和浓差极化过电势  $V_{conc}$  的影响, PEMFC 电堆建模如图 2 所示。其单电池输出电压为<sup>[20]</sup>

$$V_{out} = E_n - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (1)$$

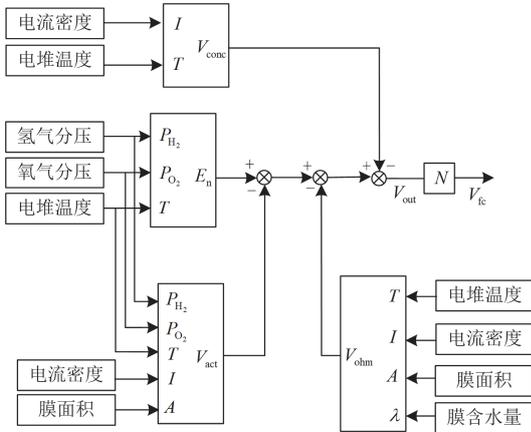


图 2 燃料电池电堆建模图

Fig. 2 Modeling diagram of fuel cell stack

PEMFC 电堆由  $N$  个串联的单电池组成, PEMFC 电堆输出电压  $V_{fc}$  可表示为

$$V_{fc} = N \cdot V_{out} \quad (2)$$

### 2) 开路电压

一般可根据简化的能斯特电动势方程<sup>[21]</sup>, 得到单电池开路电压为

$$E_n = 1.229 + 4.3085 \times 10^{-5} T \left[ \ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] - \quad (3)$$

$$8.5 \times 10^{-4} (T - 298.15)$$

式中:  $T$  表示 PEMFC 的工作温度, K;  $P_{H_2}$  和  $P_{O_2}$  分别表示氢气分压和氧气分压, atm。

### 3) 活化极化过电势

活化极化过电势包括阴极的活化电动势和阳极的活化电动势, 活化电动势是由于电极表面的反应过慢引起的, 受到工作温度  $T$ 、氢气分压  $P_{H_2}$ 、氧气分压  $P_{O_2}$  和 PEMFC 输出电流  $i$  的影响, 其计算公式为<sup>[22]</sup>

$$V_{act} = -[\varepsilon_1 + \varepsilon_2 T + \varepsilon_3 T \ln(C_{O_2}) + \varepsilon_4 T \ln(i)] \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$  为经验系数,  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_4$  的值分别为  $-0.9514$ 、 $7.4 \times 10^{-5}$ 、 $-1.87 \times 10^{-4}$ ;  $C_{O_2}$  表示  $O_2$  的溶

解浓度, mol/cm<sup>3</sup>。ε<sub>2</sub>、C<sub>O<sub>2</sub></sub>的计算公式分别为

$$\varepsilon_2 = 2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln(C_{H_2}) \quad (5)$$

$$C_{O_2} = P_{O_2} \times 1.97 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{498}{T}\right) \quad (6)$$

式中: A 表示 PEMFC 活化面积; C<sub>H<sub>2</sub></sub> 表示 H<sub>2</sub> 的溶解浓度, mol/cm<sup>3</sup>, 其计算公式为

$$C_{H_2} = P_{H_2} \times 9.17 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{77}{T}\right) \quad (7)$$

#### 4) 欧姆极化过电势

欧姆极化过电势的计算公式为<sup>[23]</sup>

$$V_{ohm} = iR_{ohm} \quad (8)$$

$$R_{ohm} = R_M + R_C \quad (9)$$

$$R_M = \frac{p_M \times l}{A} \quad (10)$$

$$p_M = \frac{181.6 \times \left[ 1 + 0.03 \times \left( \frac{i}{A} \right) + 0.06 \times \left( \frac{T}{303} \right)^2 \left( \frac{i}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \lambda - 0.634 - 3 \times \left( \frac{i}{A} \right) \right] \exp \left[ 4.18 \times \left( \frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (11)$$

式中: R<sub>ohm</sub> 表示欧姆电阻; R<sub>M</sub> 表示质子流道的等效电阻; R<sub>C</sub> 表示电子流道的等效电阻, 一般是一个常数, 取值为 0.0001~0.0008 Ω; p<sub>M</sub> 为质子交换膜的电导率, Ω·cm; l 为膜厚度; λ 表示膜含水量, mol H<sub>2</sub>O/mol SO<sub>3</sub>H, 取值通常为 0~23。

#### 5) 浓差极化过电势

浓差极化过电势由电极表面反应物浓度下降引起, 其大小与 PEMFC 的结构和工作状态有关, 计算公式为<sup>[24]</sup>

$$V_{conc} = \begin{cases} 1.1 \times 10^{-4} - 1.2 \times 10^{-6} \times (T - 273.15) \cdot e^{ni}, & T \geq 312.15 \text{ K} \\ 3.3 \times 10^{-3} - 8.2 \times 10^{-5} \times (T - 273.15) \cdot e^{ni}, & T < 312.15 \text{ K} \end{cases} \quad (12)$$

式中: n 为常数, 一般取值为 8 × 10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>/mA。

#### 6) PEMFC 最大功率点处电流限制

对于低于最大功率点的功率调节需求, PEMFC 功率特性曲线上存在两个功率相等, 但电流不相等的运行点 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>, 如图 3 所示。当 PEMFC 运行在 P<sub>2</sub> 时, PEMFC 工作在浓差极化区。由于浓差极化区电流密度过大以及局部极化的影响, 将会腐蚀电极材料, 减少电池使用寿命, 因此需要对 PEMFC 的输出电流进行限制, 可表示为

$$0 \leq i \leq I_m \quad (13)$$

式中: I<sub>m</sub> 表示 PEMFC 最大功率点处所对应的工作

电流, A。由图 3 可知, 对 PEMFC 的工作电流进行限制之后, PEMFC 只会工作在功率特性曲线的上坡段, 避免运行在浓差极化区。

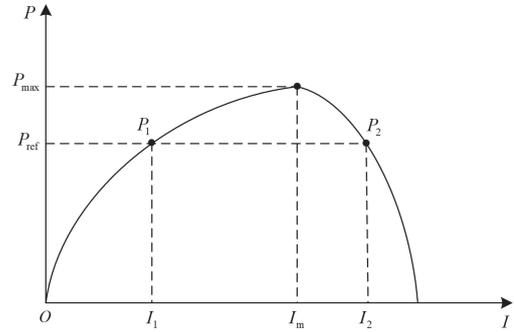


图 3 PEMFC 功率特性曲线

Fig. 3 Power characteristic curve of PEMFC

### 3 计及 PEMFC 最大功率点的调频控制策略

#### 1) 变下垂系数有功-频率下垂控制

为使 PEMFC 能根据系统负荷变化动态调节输出功率, 以抑制系统频率波动, 首先需要确定频率变化时有功功率的变化趋势。为了在系统频率变化时获取 PEMFC 应输出的参考功率值, 应建立有功功率与频率之间的等式<sup>[25]</sup>, 即

$$P_{ref} - P = K_f (f_n - f_s) \quad (14)$$

式中: P<sub>ref</sub> 表示参考有功功率; P 表示实际有功功率; f<sub>n</sub>、f<sub>s</sub> 分别表示系统额定频率和实际频率; K<sub>f</sub> 表示频率下垂系数。

将式(14)改写为

$$P_{ref} = P_0 + \Delta P = P_0 + K_f \Delta f \quad (15)$$

$$\Delta f = f_n - f_s \quad (16)$$

式中: P<sub>0</sub> 表示 PEMFC 在系统频率变化之前, 初始时刻的输出功率; ΔP 表示频率变化时相应的功率变化量; Δf 表示频率变化量。式(15)表示在系统频率变化时, PEMFC 应输出的参考功率。实际运用中, 仅靠式(15)不能完整地描述 PEMFC 输出功率与频率之间的关系, 还应当考虑在不同的频率变化情况下 PEMFC 的输出情况, 即

$$P_{ref} = \begin{cases} P_0, & \Delta f \leq |\Delta f_{DB}| \\ P_0 + K_f (\Delta f + |\Delta f_{DB}|), & \Delta f_{DB} < |\Delta f| \leq \Delta f_{max} \\ 0, & \Delta f < -\Delta f_{max} \\ P_{max}, & \Delta f > \Delta f_{max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P<sub>max</sub> 表示 PEMFC 最大功率点处的输出功率; Δf<sub>DB</sub> 表示调频死区; Δf<sub>max</sub> 表示系统运行时所允许的最大频率波动范围。

由式(17)可知, 频率变化范围不同时, PEMFC

输出功率不同。当系统频率变化量  $\Delta f$  在死区范围内, 即  $\Delta f \leq |\Delta f_{DB}|$  时, 频率变化很小, 认为系统频率稳定, PEMFC 输出功率保持初始值  $P_0$  不变; 当频率变化量超过调频死区, 即  $\Delta f_{DB} < |\Delta f| \leq \Delta f_{max}$  时, PEMFC 输出功率根据频率变化趋势, 在初始值  $P_0$  的基础上, 相应地增大或减小; 当系统频率变化量超过所允许的最大频率变化范围, 即  $\Delta f > |\Delta f_{max}|$  时, PEMFC 应按照最大功率或最小功率输出。例如当  $\Delta f > |\Delta f_{max}|$  时, 系统频率过低, 需要 PEMFC 以最大功率  $P_{max}$  进行输出, 从而弥补功率缺额, 防止系统的频率继续下跌; 当  $\Delta f < -\Delta f_{max}$  时, 频率过高, 系统功率过剩, 需要 PEMFC 停止向系统输送功率, 即输出功率为 0。

为了使 PEMFC 更好地根据负载变化和系统状态调整控制参数, 考虑到其输出功率与氢气流速有关, 设置下垂系数随氢气流速的变化而作出相应的调整, 例如当氢气流速减小时相应地增大  $K_f$ 。具体可表示为

$$\gamma = \frac{v_{flow}}{v_{flow\_max}} \quad (18)$$

$$K_f^* = \frac{K_f}{\gamma} \quad (19)$$

式中:  $v_{flow}$ 、 $v_{flow\_max}$  分别表示实际的氢气流速和 PEMFC 最大功率输出时的氢气流速, L/min;  $\gamma$  表示相对流速;  $K_f^*$  表示考虑氢气流速影响后的下垂系数。

### 2) 自适应功率跟踪控制算法

针对 PEMFC 采用最大功率点跟踪控制或恒功率控制并网时, 不具备频率调节能力的问题, 基于扰动观测法的基本原理<sup>[26]</sup>, 提出一种自适应功率跟踪控制算法。通过自适应功率跟踪控制算法, 得到负荷波动时 FEMFC 的参考输出电流, 然后利用比例-积分(proportional-integral, PI)控制, 调节 PEMFC 的实际输出电流, 进而控制 PEMFC 的输出功率。自适应功率跟踪控制算法使 PEMFC 的输出功率可以根据负荷的变化动态地调整, 达到抑制频率波动的效果。

将 PEMFC 的实际输出功率与所需输出的参考功率之间的差值定义为

$$P_{diff} = P_{ref} - P \quad (20)$$

式中:  $P_{diff}$  表示参考功率和实际功率之间的功率需求误差。

当  $P_{diff}$  满足式(21)时, 认为 PEMFC 的实际输出功率等于参考功率。

$$-\varepsilon \leq P_{diff} \leq \varepsilon \quad (21)$$

式中:  $\varepsilon$  表示允许的误差阈值。

由于系统的频率是随时间变化的, 因此若使 PEMFC 的输出功率跟随系统频率的变化动态地作出相应的调整, 应当有

$$P_{diff}^k = P_{ref}^k - P^k \quad (22)$$

$$-\varepsilon \leq P_{diff}^k \leq \varepsilon \quad (23)$$

式中:  $P_{ref}^k$  表示  $k$  时刻 PEMFC 应输出的参考功率, kW;  $P^k$  表示  $k$  时刻 PEMFC 的实际输出功率, kW;  $P_{diff}^k$  表示  $k$  时刻的功率需求误差。

基于扰动观测法的基本原理, 考虑 PEMFC 实际输出功率的变化以及输出电流的变化, 有

$$\Delta P^k = P^k - P^{k-1} \quad (24)$$

$$\Delta I^k = I^k - I^{k-1} \quad (25)$$

式中:  $P^k$ 、 $P^{k-1}$  分别表示  $k$  时刻和  $k-1$  时刻的 PEMFC 输出功率;  $\Delta P^k$  表示 PEMFC 在  $k$  时刻的功率变化量;  $I^k$ 、 $I^{k-1}$  分别表示  $k$  时刻和  $k-1$  时刻的 PEMFC 输出电流;  $\Delta I^k$  表示 PEMFC 在  $k$  时刻的电流变化量。根据  $\Delta P^k$ 、 $\Delta I^k$  的正负并结合 sign 函数, 可以确定  $k$  时刻 PEMFC 在功率特性曲线上的运行状态, 算法流程图如图 4 所示, 具体流程如下。

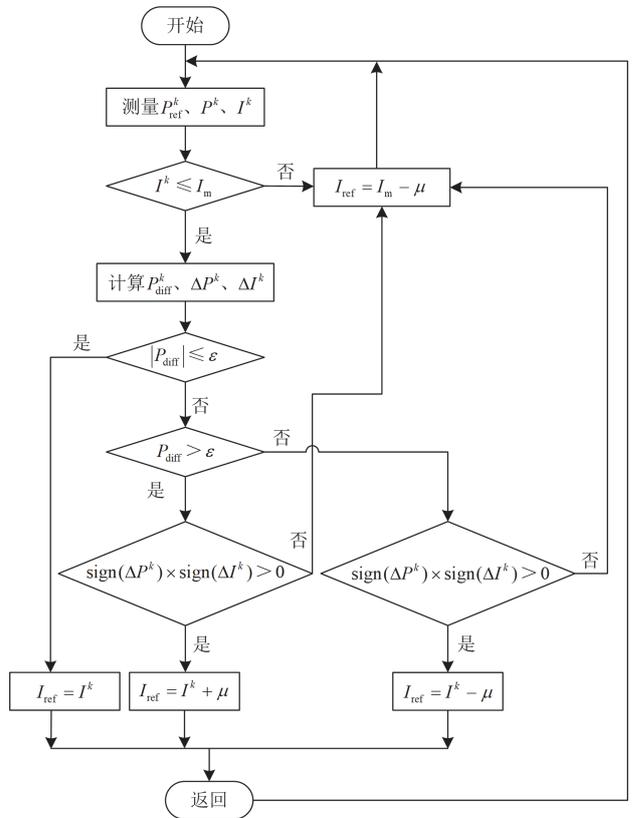


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of algorithm

算法开始时,首先对输入信号进行测量和计算,并利用判定条件判断应当执行哪一步算法。判定条件如下。

1) 当  $|P_{\text{diff}}^k| \leq |\varepsilon|$  时, PEMFC 实际输出功率等于参考功率,参考电流应当保持不变,即  $I_{\text{ref}} = I^k$ 。

2) 当  $P_{\text{diff}}^k > \varepsilon$  且  $\text{sign}(\Delta P^k) \times \text{sign}(\Delta I^k) > 0$  时, PEMFC 运行在功率特性曲线上坡段,且实际输出功率小于参考功率,为了跟踪参考功率,实际输出功率应增大,则下一时刻参考电流应增加,即  $I_{\text{ref}} = I^k + \mu$ 。其中,  $\mu$  表示电流调节量,  $\mu > 0$ 。

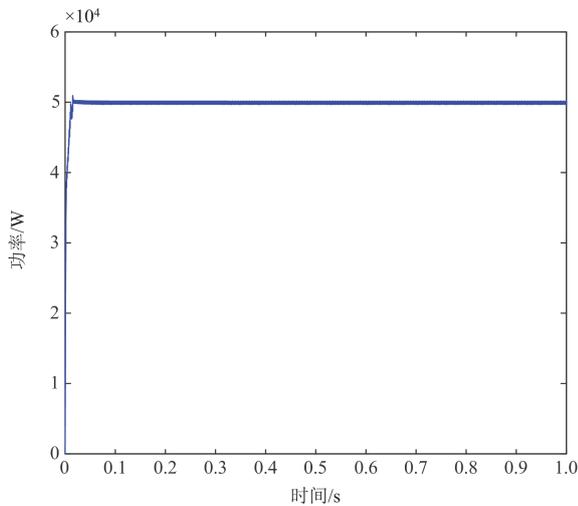
3) 当  $P_{\text{diff}}^k < -\varepsilon$  且  $\text{sign}(\Delta P^k) \times \text{sign}(\Delta I^k) > 0$  时, PEMFC 运行在功率特性曲线上下坡段,且实际输出功率大于参考功率,实际输出功率应减小,即下一时刻参考电流应减小,即  $I_{\text{ref}} = I^k - \mu$ 。

4) 当  $I^k > I_m$  时, PEMFC 运行在浓差极化区,此时应对参考电流进行调整,避免其运行在该区域,则  $I_{\text{ref}} = I_m - \mu$ 。

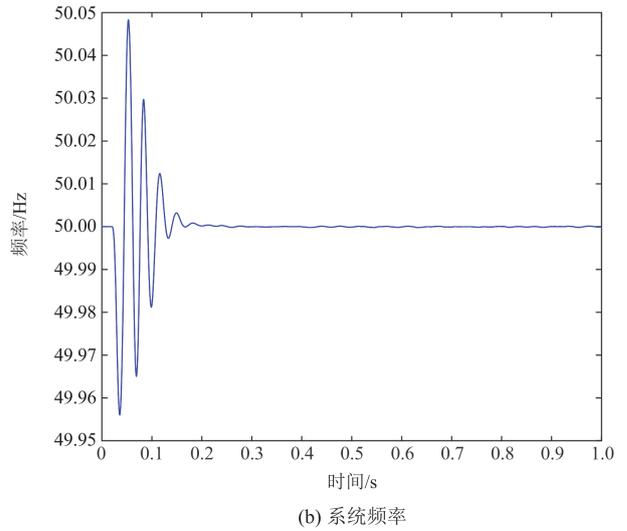
#### 4 算例分析

为验证本文所提控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建模型进行仿真实验分析。电路中原始参数设置如下:  $C_1 = 100 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 0.05 \text{ F}$ ,  $C_3 = 1 \mu\text{F}$ ,  $L_1 = L_2 = 0.001 \text{ H}$ ,  $R_1 = R_2 = 0.001 \Omega$ , 额定频率为 50 Hz。系统稳定运行时, PEMFC 输出功率和系统频率如图 5 所示。PEMFC 参数设计可参考文献[27-28],主要仿真参数如表 1 所示。

如图 5 所示,稳态时, PEMFC 稳定运行,功率维持在 50 kW,由于开机启动,系统频率产生微小波动,随后逐渐恢复稳定并保持在额定频率 50 Hz 附近。



(a) PEMFC输出功率



(b) 系统频率

图 5 稳态时系统参数  
Fig. 5 System parameters at steady state

表 1 仿真参数

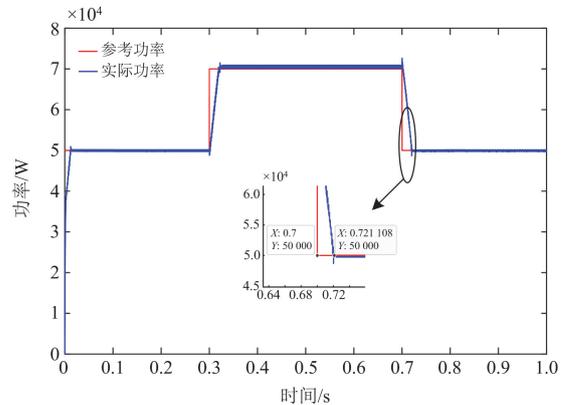
Table 1 Simulation parameter

参数	数值
PEMFC 额定功率/kW	50
电堆温度/℃	65
膜面积/cm <sup>2</sup>	280
膜厚度/cm	0.012 75
氢气分压/atm	1.5
氧气分压/atm	1

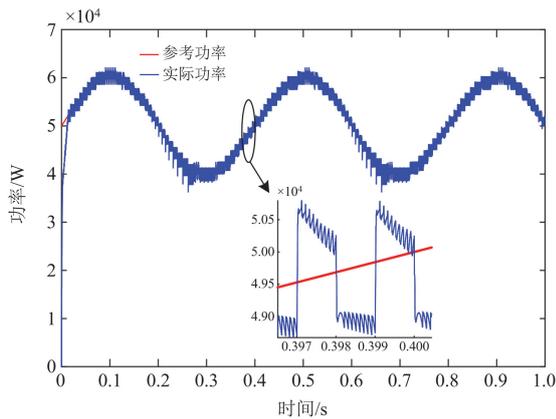
#### 4.1 检验自适应功率跟踪算法的有效性

为了验证所提自适应功率跟踪算法可以根据功率调节需求动态地调节 PEMFC 的输出功率,分别以一个阶跃信号和一个正弦信号作为参考功率信号来模拟参考功率稳定在某个值或连续变化时的功率跟踪情况,如图 6 所示。

如图 6(a)所示,在  $t = 0.3 \text{ s}$  和  $t = 0.7 \text{ s}$  时,参考功率分别阶跃变换到 70 kW 和 50 kW。PEMFC 实际输



(a) 参考功率阶跃变化时的功率跟踪情况



(b) 参考功率动态变化时的功率跟踪情况

图 6 不同功率需求条件下的 PEMFC 输出功率跟踪情况

Fig. 6 Output power tracking of PEMFC under different power demand conditions

输出功率在经过 0.02 s 微小延迟后，跟踪参考功率变化，在对应参考值下稳定输出。图 6(a)为 PEMFC 的功率跟踪情况，此时其功率需求在短时间内没有出现连续波动。图 6(b)中，当功率需求连续变化时，PEMFC 的实际输出功率动态地跟随参考功率的变化作出相应调整。经过实验发现，PEMFC 输出功率的跟踪效果受到采样频率和功率需求误差阈值的影响。采样频率升高，PEMFC 出力曲线的平滑度变好；误差阈值  $\varepsilon$  减小，PEMFC 输出功率更接近参考功率。功率跟踪的延迟时间受到功率变化范围以及仿真步长的影响，如参考功率阶跃变化时，功率变化越大，延迟时间越长；仿真步长越大，则延迟时间越短，因此 PEMFC 的实际输出功率可以更快达到参考功率值的大小，但这可能会引起输出功率波动较大，无法较好地跟随参考功率的变化。因此在设置参数时，需要综合考虑延迟时间和跟踪误差。由图 6(b)可知，参考功率动态变化时，跟踪功率的最大误差约为 1 kW。

图 7 为考虑 PEMFC 最大功率点特性的电流变化波形，可以验证所提控制策略是否能将 PEMFC 的运行限制在浓差极化区。在  $t = 0.3$  s 之前，PEMFC 经过一微小延迟后保持在功率特性曲线的上坡段稳定运行，电流大小保持不变。在 0.3 s 后，改变 PEMFC 运行点位置，使之超过最大功率点，PEMFC 输出电流将超过所设定的阈值  $I_m$ ，此时参考电流大小为最大功率点处电流  $I_m$  减去  $\mu$ 。由于 0.3 s 后输入信号恒定，电流大小一直有超过  $I_m$  的趋势，因此电流波形呈现为周期变化的矩形波。

#### 4.2 不同控制策略对系统频率的支撑效果

为了检验所提控制策略对系统频率的支撑效果，对 PEMFC 分别采用恒功率控制、固定下垂系

数的自适应功率跟踪控制以及变下垂系数的自适应功率跟踪控制。当负荷波动时，PEMFC 输出功率和系统频率波形如图 8 和图 9 所示。

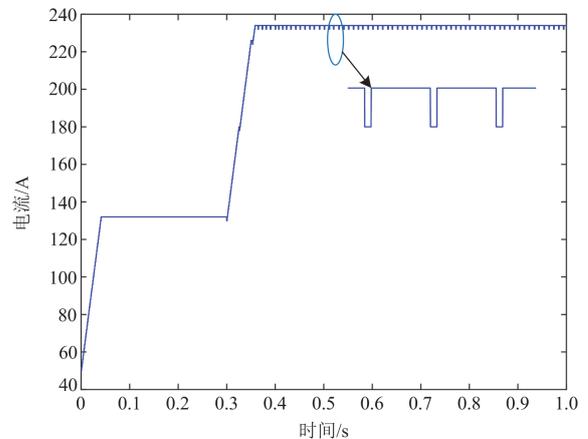
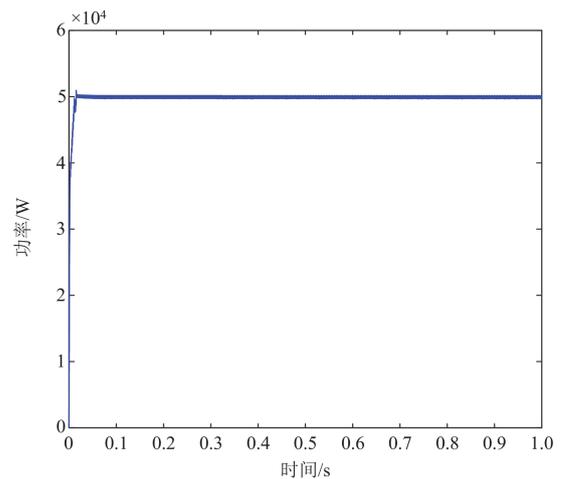
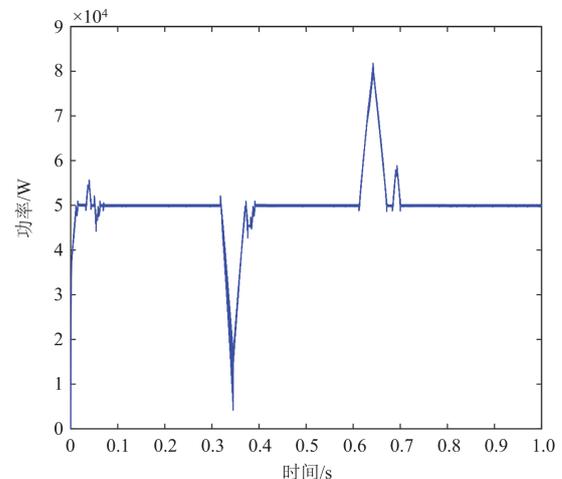


图 7 考虑 PEMFC 最大功率点特性的电流波形

Fig. 7 Current waveform considering the maximum power point characteristic of PEMFC



(a) 恒功率控制



(b) 固定下垂系数

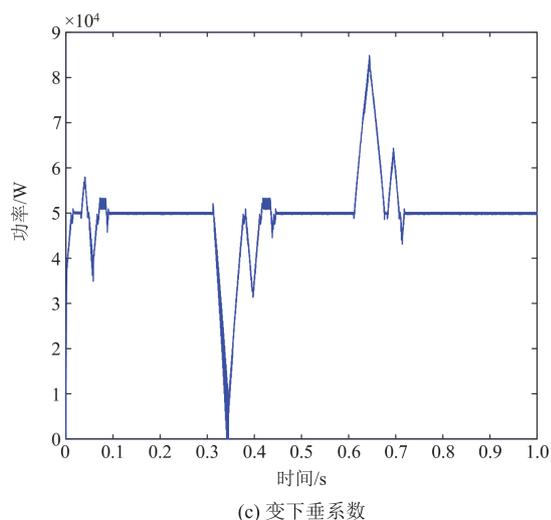


图8 不同控制方式下的PEMFC输出功率

Fig. 8 Output power of PEMFC under different control modes

如图8和图9所示,  $t = 0.3\text{ s}$ 和 $t = 0.6\text{ s}$ 时,分别切除和投入负荷。图8(a)中, PEMFC采用恒功率控制,有功功率输出保持 $50\text{ kW}$ 恒定,系统频率波形如图9(a)所示。由图9(a)可知,  $t = 0.3\text{ s}$ 和 $t = 0.6\text{ s}$ 时,由于负荷突然切除和投入,系统频率出现波动,波动峰值分别达到 $50.22\text{ Hz}$ 和 $49.79\text{ Hz}$ ,超过 $\pm 0.2\text{ Hz}$ 的限制。图8(b)、图8(c)和图9(b)、图9(c)分别对应PEMFC采用固定下垂系数以及变下垂系数的自适应功率跟踪控制时的输出功率曲线和系统频率波形。采用固定下垂系数控制时,  $0.3\text{ s}$ 和 $0.6\text{ s}$ 出现的频率波动峰值受到削减,分别削减为 $50.19\text{ Hz}$ 和 $49.81\text{ Hz}$ 。采用变下垂系数控制时,  $0.3\text{ s}$ 和 $0.6\text{ s}$ 出现的频率波动峰值分别削减为 $50.17\text{ Hz}$ 和 $49.84\text{ Hz}$ 。3种控制策略下的频率波动峰值对比结果见表2。

从图8和图9可以看出,在PEMFC采用恒功率控制时,由于输出功率保持不变,PEMFC无法在

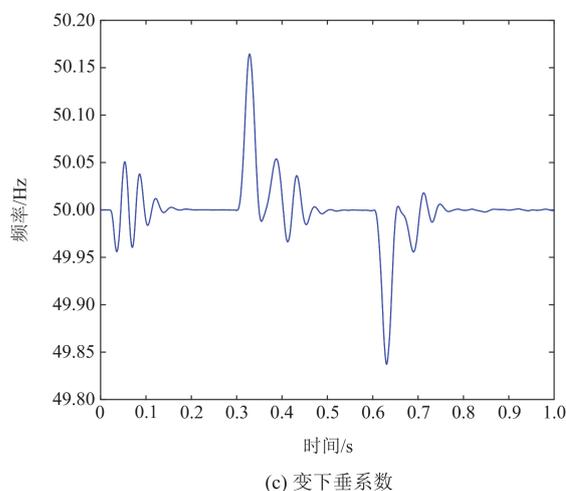
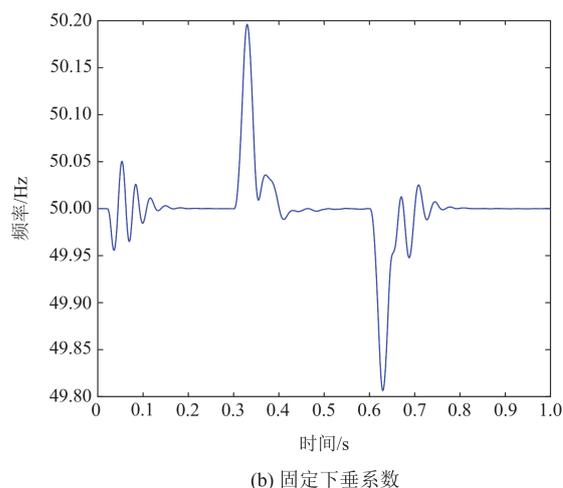
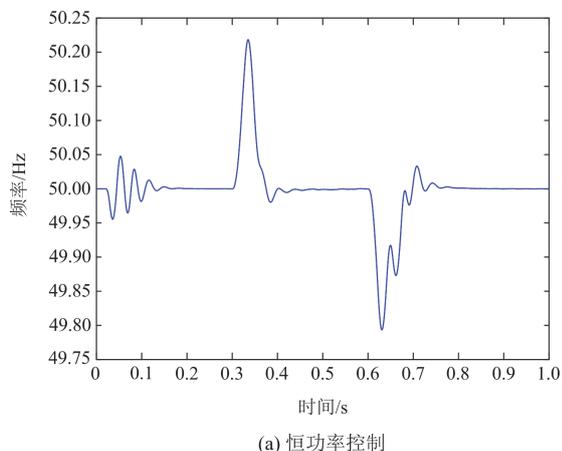


图9 不同控制方式下的系统频率

Fig. 9 System frequency under different control modes

表2 不同控制方式下的系统频率波动峰值

Table 2 Peak system frequency fluctuations under different control modes

控制方式	频率最大值/Hz	频率最小值/Hz
恒功率控制	50.22	49.79
固定下垂系数控制	50.19	49.81
变下垂系数控制	50.17	49.84

负荷波动时进行功率补偿,导致系统频率波动很大,超出了所允许的最大频率偏差范围。采用自适应功率跟踪控制时,PEMFC的输出功率可以根据负荷变化进行调整,自动地调整出力来进行功率补偿,从而抑制了频率波动。对比图8(b)、图8(c)的PEMFC输出功率曲线以及图9(b)、图9(c)系统频率波形可知,在对应的频率波动峰值,采用固定下垂系数控制时的PEMFC最大出力为 $80.16\text{ kW}$ ,最小出力为 $4.01\text{ kW}$ ;采用变下垂系数控制时,PEMFC最大出

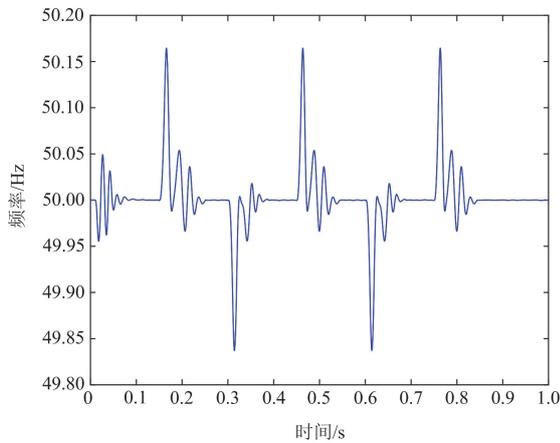
力 85.69 kW，最小出力为 0。可见，采用变下垂系数控制时，PEMFC 的出力深度要高于固定下垂系数控制，能更好地进行功率补偿。

### 4.3 不同场景下所提控制策略对系统频率的支撑效果

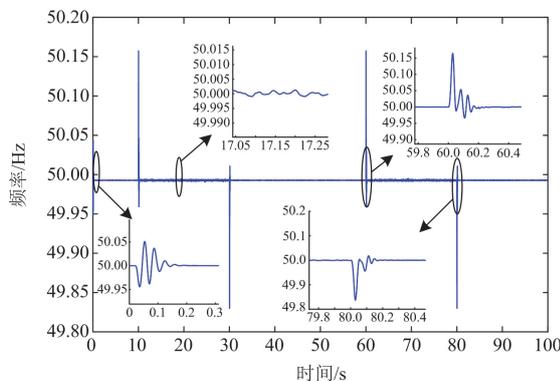
采用以下 3 种不同的场景来检验所提控制策略对系统频率的支撑效果：系统运行时短期内负荷剧烈波动、系统长期运行时负荷突然波动以及系统长期运行时负荷长时间高频波动。3 种场景下系统的频率波形如图 10 所示。

如图 10(a)所示，分别在  $t = 0.15\text{ s}$ 、 $t = 0.3\text{ s}$ 、 $t = 0.45\text{ s}$ 、 $t = 0.6\text{ s}$  以及  $t = 0.75\text{ s}$  时投切负荷，用于检验在短时间内负荷剧烈波动的极端情况下，系统频率的稳定性。可见当负荷在短时间内频繁切换时，系统频率出现连续较大波动，波动峰值分别为 50.17 Hz 和 49.84 Hz。系统频率在短时间连续波动后，最终稳定在 50 Hz 额定频率附近。

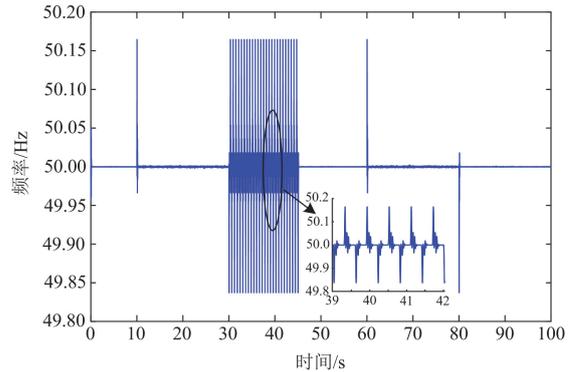
如图 10(b)所示，在系统长期稳定运行时，分别在  $t = 10\text{ s}$ 、 $t = 30\text{ s}$ 、 $t = 60\text{ s}$  以及  $t = 80\text{ s}$  时投切负荷，用于检验在长时间尺度下负荷突然波动时，系统频率的稳定性。由图 10(b)可知，在  $t = 10\text{ s}$ 、 $t = 60\text{ s}$  时切除负荷，系统频率升高，波动峰值为



(a) 短期内负荷剧烈波动时的系统频率



(b) 长期运行时负荷长时间高频波动时的系统频率



(c) 长期运行时负荷长时间高频波动时的系统频率

图 10 3 种场景下的系统频率

Fig. 10 System frequency under three scenarios

50.17 Hz；在  $t = 30\text{ s}$  以及  $t = 80\text{ s}$  时投入负荷，系统频率降低，波动峰值为 49.84 Hz，频率偏差范围在允许的  $\pm 0.2\text{ Hz}$  范围内。最终频率波动经过衰减，稳定在 50 Hz 额定频率附近，系统保持长期稳定运行。

如图 10(c)所示，在图 10(b)的基础上，在  $t = 30\text{ s}$  时，每隔 0.3 s 对负荷进行投切，持续时间为 15 s。可见在 30~45 s，系统在较长时间的负荷高频波动下，系统频率波动峰值分别为 50.17 Hz 和 49.84 Hz，其频率偏差在允许的  $\pm 0.2\text{ Hz}$  范围内，系统频率最终恢复到 50 Hz 额定频率附近。可见，在长时间高频波动时，所提控制策略能较好地维持系统的频率稳定性。

综上所述，本文所提基于自适应功率跟踪控制的 PEMFC 调频控制策略，可以使 PEMFC 的输出功率在系统负荷变化时根据需求进行动态调节，从而对系统的频率起到支撑作用；通过对 PEMFC 工作电流进行控制，可以限制 PEMFC 在功率特性曲线上的运行位置，延长其使用寿命；在短时间内负荷剧烈波动、长时间尺度运行下负荷突然波动以及长时间高频波动的情况下，仍可保持系统的稳定运行。

## 5 结论

针对 PEMFC 并网时的调频问题，本文搭建了相应的模型，通过对比分析，验证了所提控制策略的有效性，得出了以下结论。

- 1) 通过对 PEMFC 采用本文所提调频控制策略，使其可以根据调节需求动态地调整输出功率的大小，更好地对系统进行功率补偿，从而抑制系统频率波动，保持系统的长期稳定运行。
- 2) 通过对 PEMFC 功率特性曲线上最大功率点处的电流进行限制，阻止了 PEMFC 运行在浓差极化区。
- 3) 考虑 PEMFC 自身特性，采取变下垂系数控

制,相比于固定下垂系数控制,PEMFC出力深度更大,频率波动峰值进一步削减0.02 Hz和0.03 Hz。

4) 本文所提 PEMFC 调频控制策略可以为 PEMFC 并网参与调频提供一种思路。可以设计更精细化的有功-频率下垂控制模型和自适应功率跟踪控制算法模型,使 PEMFC 出力根据调节需求更加快速、准确、稳定地作出响应,进一步提升其频率支撑能力。

#### 参考文献

- [1] KHALIL M, DINCER I. Investigation of a community-based clean energy system holistically with renewable and hydrogen energy options for better sustainable development[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 440.
- [2] 张红, 袁铁江, 谭捷, 等. 面向统一能源系统的氢能规划框架[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 83-94. ZHANG Hong, YUAN Tiejing, TAN Jie, et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 83-94.
- [3] 张韶华, 王必恒, 石城, 等. 基于分布鲁棒优化的电热综合能源配网系统与氢能源站协同优化[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(12): 36-43. ZHANG Shaohua, WANG Biheng, SHI Cheng, et al. Collaborative optimal dispatching of integrated electricity-heat energy distribution network system and hydrogen fueling station based on distributionally robust optimization[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(12): 36-43.
- [4] 潘超, 郭晨雨, 刘继哲, 等. 电-氢混合储能参与的多能系统低碳优化[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(2): 21-29. PAN Chao, GUO Chenyu, LIU Jizhe, et al. A study on low-carbon optimization of the multi-energy system with electricity-hydrogen hybrid energy storage participation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(2): 21-29.
- [5] 李建林, 梁策, 曾飞, 等. 基于级联式模糊控制的电氢耦合直流微网能量管理策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(18): 87-100. LI Jianlin, LIANG Ce, ZENG Fei, et al. An energy management strategy for an electricity-hydrogen coupled DC microgrid based on cascade fuzzy control[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(18): 87-100.
- [6] 赵海岭, 王维庆, 李笑竹, 等. 发电侧多主体投资低碳综合微网氢储能的演化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 49-62. ZHAO Hailing, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, et al. Evolution strategy of low carbon integrated microgrid hydrogen energy storage with multi-agents investment on the power generation side[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 49-62.
- [7] 李彬, 潘雨情, 文华杰, 等. 基于碳减排的氢电资源耦合发展现状及展望[J]. *供用电*, 2023, 40(10): 106-113. LI Bin, PAN Yuqing, WEN Huajie, et al. Current status and prospects of hydrogen electricity resource coupling development based on carbon emission reduction[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(10): 106-113.
- [8] 刘倩, 贾健雄, 靳幸福, 等. 基于改进双层鲁棒的氢-电混合时间尺度联合储能系统规划[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(10): 17-23, 35. LIU Qian, JIA Jianxiong, JIN Xingfu, et al. Planning of hydrogen-electric hybrid time scale joint energy storage system based on improved bi-level robustness method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(10): 17-23, 35.
- [9] DAI F, WANG X, KANG W. Design and simulation of current-fed dual-active full-bridge DC/DC converter control system applied to proton exchange membrane fuel cell[C] // *Proceedings of the 2021 2nd International Conference on Energy, Power and Environmental System Engineering (ICEPESE 2021)*, 2021, 11.
- [10] YI Y, LI C, LI X, et al. Modeling and optimization of a residential PEMFC-based CHP system under different operating modes[J]. *Applied Energy*, 2024, 353.
- [11] 樊立萍, 童兵. 基于 BOOST 变换器的 MFC 最大功率跟踪控制[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 274-280. FAN Liping, TONG Bing. Maximum power tracking control of microbial fuel cell based on boost convertor[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(2): 274-280.
- [12] FAM J Y, WONG S Y, BASRI H B M, et al. Predictive maximum power point tracking for proton exchange membrane fuel cell system[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 157384-157397.
- [13] AHMED F, ALI M A, OLABI A G, et al. A novel strategy based on salp swarm algorithm for extracting the maximum power of proton exchange membrane fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(8): 6087-6099.
- [14] FAM J Y, WONG S Y, BASRI H B M, et al. An enhanced maximum power point tracking and voltage control for proton exchange membrane fuel cell using predictive model control techniques[J]. *Energy Reports*, 2024, 12: 2958-2970.
- [15] ZHOU C, LIU Z, SUN Y, et al. A novel maximum power point tracking technique with improved particle swarm optimization for proton exchange membrane fuel cell[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2347(1).
- [16] YAMAMOTO S, MITANI Y, WATANABE M, et al. Fuel cell co-generation and PCS control for suppressing

- frequency and voltage fluctuation due to PV power[J]. International Journal of Electronics and Electrical Engineering, 2021, 9(2): 48-51.
- [17] 李晨, 任洲洋, 李文沅. 考虑燃料电池和电解槽虚拟惯量支撑的电力系统优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(11): 9-16.  
LI Chen, REN Zhouyang, LI Wenyuan. Optimal scheduling method of power system considering virtual inertia support of fuel cells and electrolyzers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(11): 9-16.
- [18] EMON I I, JOWEL A R, JAWAD A, et al. Participation of battery energy storage system for frequency control in wind dominated power systems: an analytical approach[J]. Energy Reports, 2023(10): 1268-1286.
- [19] 李建林, 胡筋扬, 辛迪熙, 等. 基于参数自调节的电氢耦合系统调频控制策略研究[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 1-11.  
LI Jianlin, HU Jiayang, XIN Dixi, et al. Research on frequency modulation control strategy of electric-hydrogen coupling system based on parameter self-regulation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 1-11.
- [20] 马遵, 和鹏, 许珂玮, 等. 基于混沌博弈优化的固体氧化物燃料电池模型参数优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 15-28.  
MA Zun, HE Peng, XU Kewei, et al. Optimal parameter design of models for SOFCs using chaos game optimization[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 15-28.
- [21] 张领先, 谢长君, 杨扬, 等. 基于改进混沌粒子群的 PEMFC 模型参数辨识[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(1): 29-39.  
ZHANG Lingxian, XIE Changjun, YANG Yang, et al. Parameter identification of PEMFC model based on improved chaotic particle swarm optimization[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(1): 29-39.
- [22] 王季康, 李华, 彭宇飞, 等. PEMFC 建模及性能分析控制[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 27-34.  
WANG Jikang, LI Hua, PENG Yufei, et al. PEMFC modeling and performance analysis control[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(8): 27-34.
- [23] 王璇, 郭健翔, 韦庆生, 等. 基于 Thermolib 的低氢压 PEMFC 建模及仿真分析[J]. 电源技术, 2024, 48(4): 711-717.  
WANG Xuan, GUO Jianxiang, WEI Qingsheng, et al. Modeling and simulation analysis on a PEMFC under low hydrogen pressure based on Thermolib[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(4): 711-717.
- [24] 陈家城, 周苏. 大功率质子交换膜燃料电池建模及仿真[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 290-297.  
CHEN Jiacheng, ZHOU Su. Modeling and simulation of high-power proton exchange membrane fuel cells[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(3): 290-297.
- [25] 董志国, 徐全海, 陈琦, 等. 参与电网调频的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 146-155.  
DONG Zhiguo, XU Quanhai, CHEN Qi, et al. Improved droop control strategy involved in power grid frequency regulation for VSC-MTDC transmission systems[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 146-155.
- [26] 商立群, 李帆. 基于自适应布谷鸟搜索和扰动观察法的光伏最大功率点跟踪[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 99-107.  
SHANG Liqun, LI Fan. PV power point tracking based on adaptive cuckoo search and perturbation observation method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 99-107.
- [27] 万昱, 肖纯, 易子淳, 等. PEMFC 热管理系统建模与控制策略研究[J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46(3): 156-164.  
WAN Yu, XIAO Chun, YI Zichun, et al. PEMFC thermal management system design and research[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024, 46(3): 156-164.
- [28] 王季康, 李华, 彭宇飞, 等. 质子交换膜燃料电池多时间尺度下的动态特性[J]. 物理学报, 2022, 71(15): 337-346.  
WANG Jikang, LI Hua, PENG Yufei, et al. Dynamic characteristics of proton exchange membrane fuel cell on a multiple time scale[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(15): 337-346.

收稿日期: 2024-12-01; 修回日期: 2025-03-04

作者简介:

马成(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能并网运行控制; E-mail: 2697068392@qq.com

李笑竹(1990—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新型电力系统运行调控、新型储能规模化应用。E-mail: lixiaozhu@xju.edu.cn

(编辑 许威)