

DOI:10.11784/tdxbz202503032

电制甲醇系统虚拟惯量建模及其抗扰动分段控制方法

王彪¹, 杨平¹, 刘凡¹, 李思洁¹, 石文辉², 屈姬贤²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 611756; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 针对传统功率控制下电制甲醇系统并网导致电力系统储存转动惯量降低, 影响电力系统稳定运行的问题, 建立了电制甲醇系统虚拟惯量模型, 并提出一种抗扰动分段控制方法, 提高了电制甲醇系统的惯性支撑能力。首先, 针对电制甲醇系统无转动惯量的问题, 结合甲醇电解槽、甲醇罐的运行特性, 对电制甲醇系统的运行特征进行虚拟惯量表征, 引入其虚拟惯量的概念, 建立了电制甲醇系统的虚拟惯量模型, 使无转动惯量的电制甲醇系统具备惯性支撑能力。其次, 针对电制甲醇系统传统控制策略的不足, 提出电制甲醇系统抗扰动分段控制方法, 引入电网频率偏差信号, 将电制甲醇系统的运行状态划分为惯量支撑区与非惯量支撑区, 在电网受到扰动时, 运行状态为惯量支撑区, 使电制甲醇系统快速调节运行功率为电网提供短时惯性支持; 在电网稳定运行时, 运行状态为非惯量支撑区, 使电制甲醇系统以额定功率运行, 高效率制取甲醇。引入电制甲醇系统功率控制增益系数, 控制电制甲醇系统的运行状态, 保障其安全运行。最后, 以某海岛的电网结构为例, 利用 MATLAB/Simulink 软件建立并网友仿真模型, 在不同的电网扰动下进行时域仿真。结果表明, 所提出的电制甲醇系统抗扰动分段控制方法在不同的扰动情况下均能快速响应电力系统扰动, 为电网提供短时惯性支持, 提高电力系统运行的稳定性。

关键词: 电制甲醇系统; 虚拟惯量; 惯量响应; 频率支持; 频率响应

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)02-0111-10

Virtual Inertia Modeling and Disturbance-Resistant Segmented Control Method for Electro-Methanol Production System

Wang Biao¹, Yang Ping¹, Liu Fan¹, Li Sijie¹, Shi Wenhui², Qu Jixian²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The presence of reduced stored rotational inertia in the power system, attributable to the integration of the electro-methanol production system into the grid under conventional power control, impacts the stable operation of the power system. To address this issue, a virtual inertia model is developed for the electro-methanol production system, along with a disturbance-resistant segmented control method that aims to enhance its inertia support capability. First, given the absence of rotational inertia in the electro-methanol production system, a virtual inertia characterization is conducted based on the operational characteristics of the methanol electrolyzer and methanol storage tank. The concept of virtual inertia is hereby introduced. Subsequently, a virtual inertia model is developed, enabling the inertia-less electro-methanol production system to provide inertia support. Second, a disturbance-resistant segmented control method is proposed to overcome the limitations of conventional control strategies. This method incorporates the grid frequency deviation signal to divide the operating states of the electro-methanol production system into an inertia support region and a non-inertia support region. Under grid disturbance conditions, the system enters the inertia support region and rapidly adjusts its operating power to provide short-term inertia support. Conversely, under

收稿日期: 2025-03-24; 修回日期: 2025-04-14.

作者简介: 王彪(2000—), 男, 博士研究生, 2023200421@my.swjtu.edu.cn.

通信作者: 杨平, pyang@swjtu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U25B20206, 52277201); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682024GF001); 四川省高效电源变换技术工程研究中心基金资助项目.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U25B20206, No. 52277201), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2682024GF001), the Sichuan Provincial Engineering Research Center of High Efficiency Power Converter Technology.

stable grid conditions, the system efficiently produces methanol in the non-inertia support region at rated power. Furthermore, a power control gain coefficient is incorporated to regulate the operating state of the electro-methanol production system and ensure its safe operation. Finally, a grid-connected simulation model was constructed in MATLAB/Simulink based on the power grid structure of an island, and time-domain simulations were conducted under various grid disturbance scenarios. The findings indicate that the proposed disturbance-resistant segmented control method will prompt a swift response of the electro-methanol production system to various disturbances, thereby providing short-term inertia support and enhancing the stability of power system operation.

Keywords: electro-methanol production system; virtual inertia; inertia response; frequency support; frequency response

在“碳中和、碳达峰”的战略目标下,中国大力发展可再生能源。甲醇作为重要的化工原料,已逐渐成为全球公认的清洁能源,广泛应用于化工、燃料电池等领域,因此大力发展绿色甲醇技术是甲醇能源未来发展的焦点^[1-2]。

随着风力发电系统、光伏发电系统、电制氢系统与电制甲醇系统等新型能源系统通过电力电子变换器并网,电力系统正逐步转化为高度电力电子化的新型电力系统,与此同时面临着系统惯量降低、电力系统运行稳定性下降等问题。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略成为解决这一问题的关键技术,即将同步发电机内部的工作机理与运行特点等效运用在电力电子变换器上,并通过附加储能单元,使并网逆变器电力电子变换器表现出同步发电机的特征^[3-9]。

针对风力发电系统,文献[10]提出了一种虚拟惯性控制与辅助阻尼控制器相结合的自适应控制方法,建立了风机并网数学模型,并利用多面体线性参数变化系统与基于间隙度量的非线性评估方法设计自适应阻尼控制参数,同时为电网提供阻尼和惯量。文献[11]提出风储直流微网的虚拟惯性控制策略,结合直流母线电压与大电网瞬时功率调节、蓄电池下垂系数调节以及风电机组转速调节,使得各变流器在系统受到扰动时可以虚拟出较大电容值,提高系统惯性。文献[12]提出基于系统频率安全需求的风储虚拟惯性协同支撑控制方法,即通过调用风储虚拟惯量储备,实现系统频率支撑的同时,解决频率恢复期间惯量超调导致的频率波动问题。文献[13]提出基于风电惯量释放和储能稳态支撑的风储协调控制策略,通过风电与储能并行,在降低储能系统容量需求的同时,充分发挥风电机组短时功率的支撑作用。

光伏发电系统通过 DC/DC 变换器并入直流母线,再通过逆变器并入交流电网,不具备旋转动能,并不能为系统提供惯性支持,但可通过附加储能系统组成光储系统,通过调节储能系统中的能量实现对光

储系统的有功功率调节,从而为电力系统提供惯性支持。文献[14]提出基于光储发电系统的虚拟惯量控制策略,通过调节蓄电池的荷电状态变化率与充放电电流的速率,在短时间内调节蓄电池的储备能量为系统提供惯量支持。文献[15]提出了一种虚拟惯性频率控制策略,通过调节直流母线电容器与光伏蓄电池的能量为系统提供惯量支持,从而抑制频率恢复过程中发生频率突变。文献[16]通过在 VSG 虚拟调速器方程中引入积分补偿对 VSG 控制策略进行改进,消除负荷变化引起的频率偏差,并通过协调控制调整蓄电池储能充电状态,平抑光照强度变化引起的频率偏差。

针对电解制氢系统,文献[17]通过分析电解槽、电力电子接口(power-electronics interface, PEI)以及控制回路,建立基于堆栈模型参数、氢生产操作限制、堆栈温度动态及主动功率参考生成策略,提供应急及调节频率支持,通过调节有功功率为电力系统提供惯性支持。文献[18]提出电流源型虚拟同步机控制策略,根据系统频率改变电解制氢负荷的制氢功率,实现暂态过程的惯量阻尼支撑及稳态时的一次频率调节,提升系统的频率稳定性。

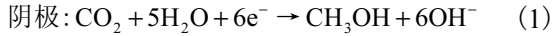
目前对于虚拟惯量方面的研究多针对风储、光储等混合能源系统,鲜有学者探究电制甲醇系统(electro-methanol production system, EMPS)等电化学系统对电力系统的惯性支持。因此笔者建立了电制甲醇系统虚拟惯量模型,并提出一种抗扰动分段控制方法,通过引入电网频率分量,结合电制甲醇系统的虚拟惯量模型,实现对电制甲醇系统的功率控制,为电力系统提供惯性支持。首先,对电制甲醇系统进行建模分析,探究电制甲醇系统为电力系统提供惯量支持的可行性;其次,表征电力系统受到扰动时同步发电机的运行特性,提出电制甲醇系统的虚拟惯量模型;然后,引入电网频率分量,通过频率偏差划分电制甲醇系统的运行状态,在电网受到扰动时,使电制甲醇系统快速调节运行功率为电网提供短时惯性支持;在电网稳定运行时,使电制甲醇系统以额定功率

运行,高效率制取甲醇.最后,为验证所提出电制甲醇抗扰动分段控制方法的有效性,利用 MATLAB/Simulink 仿真软件建立电制甲醇系统并网模型.

1 电制甲醇系统特性分析

电制甲醇系统主要由甲醇电解槽与甲醇罐(methanol storage tank, MST)等单元构成,通过电力电子变换器并网,不含转动惯量,但电制甲醇系统可将电力系统输入的电能转化为化学能,存储的甲醇中同样蕴含大量的能量,若可在短时间内调配电制甲醇系统中储存的能量,则同样可认为电制甲醇系统拥有抑制电网扰动的能力.

笔者以碱性环境下一步法制甲醇为例,建立甲醇电解槽模型.其中电化学还原 CO_2 制 CH_3OH 阴极反应方程式^[19]为



电化学还原 CO_2 制 CH_3OH 的法拉第效率计算式为

$$\eta = \frac{Vv\rho/MZF}{Q} \quad (2)$$

式中: η 为法拉第效率; V 为溶液总体积, mL; v 为甲醇的体积分数, %; ρ 为甲醇的密度, g/mL; M 为甲醇的摩尔质量, g/mol; Z 为电极转移数, $Z=6$; F 为法拉第常数, C/mol; Q 为通入的电量, C.

碱性电解槽由多个电解室串联组成,通过 DC/DC 变换器与 AC/DC 变换器接入电网,电解室与电解堆栈及其简化等效电路如图 1 所示,电解室两端电压由可逆电压、欧姆过电压以及极化过电压组成,电压电流方程为

$$U_{\text{el}} = N_{\text{el}}(U_{\text{rev}} + U_{\text{ohm}} + U_{\text{act}}) \quad (3)$$

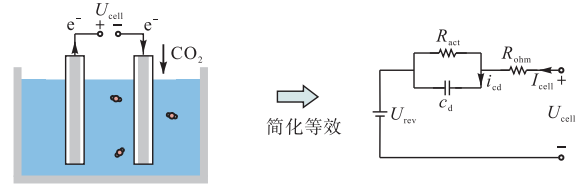
其中

$$U_{\text{rev}} = \Delta G / (zF) \quad (4)$$

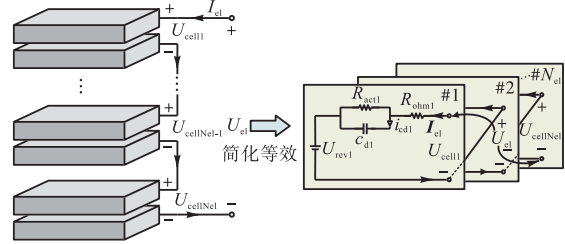
$$U_{\text{ohm}} = \frac{r_1 + r_2 t_{\text{el}}}{A_{\text{el}}} I_{\text{el}} \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_{\text{act}} = \alpha \ln \left(1 + \frac{\beta}{A_{\text{el}}} I_{\text{el}} \right) \\ \alpha = s_1 + s_2 t_{\text{el}} + s_3 t_{\text{el}}^2 \\ \beta = t_1 + t_2 / t_{\text{el}} + t_3 / t_{\text{el}}^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: U_{rev} 为可逆电压; U_{ohm} 为欧姆过电压; U_{act} 为极化过电压; ΔG 为电化学反应的吉布斯自由能变; r_1 、 r_2 为欧姆过电压温度系数; s_1 、 s_2 、 s_3 、 t_1 、 t_2 、 t_3 为电极过电压参数; A_{el} 为电极反应面积; t_{el} 为电解液温度, $^{\circ}\text{C}$; N_{el} 为电解室串联个数; U_{el} 、 I_{el} 为电解槽的输入电压与电流.具体参数见表 1.



(a) 电解室及其等效电路



(b) 电解堆栈结构及其等效电路

图 1 电解槽结构及其等效电路

Fig.1 Electrolyzer structure and equivalent circuit

表 1 甲醇电解槽参数

Tab.1 Methanol electrolyzer parameter

$r_1/$ ($\Omega \cdot \text{m}^2$)	$r_2/$ ($\Omega \cdot \text{m}^2/^{\circ}\text{C}$)	$s_1/$ V	$s_2/$ ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$)	$s_3/$ ($\text{V}/^{\circ}\text{C}^2$)	$t_1/$ (m^2/A)	$t_2/$ ($\text{m}^2/(\text{A} \cdot ^{\circ}\text{C})$)	$t_3/$ ($\text{m}^2/(\text{A} \cdot ^{\circ}\text{C}^2)$)	$F/$ (C/mol)	$A_{\text{el}}/$ m^2	$t_{\text{el}}/$ $^{\circ}\text{C}$	N_{el}
0.000 073	-0.000 011	0.16	0.00 1 38	-0.000 016	0.016	-1.3	412	96 500	0.25	25	20

根据式(3)~(6)与表 1 中参数,得到甲醇电解槽端电压与电流、温度的关系如图 2 所示.从图 2 可知,甲醇电解槽端电压随输入电流增大而增大,且随着温度升高,其电压-电流特性曲线呈下降趋势.

同理可得甲醇电解槽输入功率与电流、温度的关系如图 3 所示.

由图 3 可知,当温度一定时,甲醇电解槽的输入功率与输入电流存在线性关系,而甲醇的生产速率与电解槽输入功率存在关联,因此可通过控制电解槽的输入电流调节电解槽的有功功率,从而在短时间内进

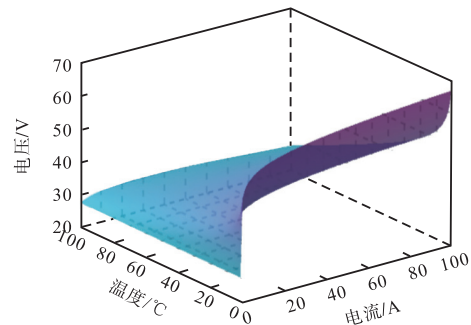


图 2 电解槽各参数关系

Fig.2 Relationship among electrolyzer parameters

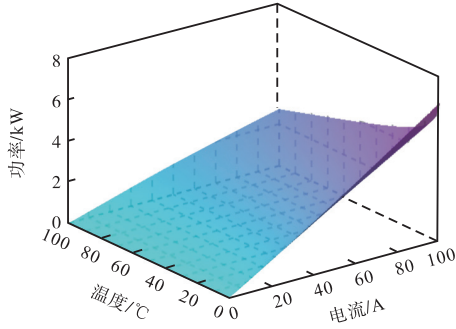


图 3 电解槽功率-温度-电流关系

Fig.3 Relationship of electrolyzer power-temperature-current

行功率调节,为电力系统提供惯量支持。

2 电制甲醇系统虚拟惯量表征与建模

在电力系统中,惯量响应过程可概括为通过引入频率信号,控制功率输出,快速进行功率调节,从而像同步发电机一样对频率波动产生响应,这种抑制电网频率波动能力的大小被定义为惯量。

2.1 电制甲醇系统虚拟惯量模型

电力系统中发电机组通常为同步发电机组。同步发电机主要由定子和转子两部分组成,其转子可视为储存能量的场所,蕴含丰富的旋转动能,即转动惯量。当电网出现扰动时,同步发电机释放转子中储存的动能快速响应电网扰动,抑制电网频率波动。因此,电力系统的惯量来源于同步发电机中储存的动能,忽略阻尼作用,转子中存储的旋转动能为

$$E_{k_SG} = \int \frac{1}{p_n^2} J_s \omega_e d\omega_e = \frac{1}{2p_n^2} J_s \omega_e^2 \quad (7)$$

式中 E_{k_SG} 、 p_n 、 J_s 、 ω_e 分别为同步发电机存储的动能、电极对数、转动惯量、转子角速度。

电力系统中,通常定义同步角速度下转子储存的动能与发电机总容量的比值为系统的惯量,即

$$H_{s_SG} = \frac{E_{k_SG}}{S_{k_SG}} = \frac{1}{2p_n^2} \frac{J_s \omega_e^2}{S_{k_SG}} \quad (8)$$

式中 H_{s_SG} 和 S_{k_SG} 分别为同步发电机的惯量和额定容量。

因此,同步发电机中转子储存的旋转动能决定着电力系统惯量的大小。随着新能源替代传统发电机发电并网,电力系统的转动惯量也随之减少,电力系统运行的稳定性降低。

电制甲醇系统通过无旋转动能的电力电子变换器并网,因此并网时会降低电力系统的转动惯量。但电制甲醇系统工作过程中可将电力系统输入的电能

转化为甲醇所储存的化学能,因此可利用电制甲醇系统存储的能量拓展系统转动惯量的能量来源,为电力系统提供惯性支持。

电化学储能通过铅酸电池储存电能,电制氢系统储能通过压缩机将氢气压缩到储存罐进行存储。不同于电能与氢能的储存,电制甲醇系统只需将制取的甲醇运输到 MST 中即可。存储过程中需考虑甲醇罐的容量,因此使用甲醇罐剩余储存体积与甲醇罐的额定体积表征甲醇罐的安全系数,定义 t 时刻甲醇罐的安全系数 γ_{MST} 为

$$\gamma_{MST} = \frac{V_{MST} - \int_0^t m_{MeOH} dt}{V_{MST}} = \frac{V_{MST} - Q_{MeOH}}{V_{MST}} \quad (9)$$

式中 γ_{MST} 、 V_{MST} 、 m_{MeOH} 、 Q_{MeOH} 分别为 MST 的安全系数、额定体积、单位时间内甲醇的生产速率和甲醇的产量。

结合式(9),电制甲醇系统在运行过程中吸收的能量 E_{MeOH} 可表示为

$$\begin{aligned} E_{MeOH} &= \int U_{el} i_{el}(t) dt = \int P_{elin}(t) dt = \\ &= \frac{1}{k} \int k P_{elin}(t) dt = \frac{1}{k} \int m_{MeOH}(t) dt = \\ &= \int \frac{V_{MST}}{k} d(1 - \gamma_{MST}) = \frac{P_{MeOH}}{k} = \frac{\gamma_{MST,0} V_{MST}}{k} \quad (10) \end{aligned}$$

其中

$$m_{MeOH} = k P_{elin} = k U_{el} i_{el} \quad (11)$$

式中: $\gamma_{MST,0}$ 为甲醇罐的初始安全系数; i_{el} 、 P_{elin} 分别为甲醇电解槽的运行过程中的输入电流、输入功率; k 为甲醇生产速率与电制甲醇系统输入功率之间的关系系数。

由第 1 节分析可知,电制甲醇系统可通过调节甲醇电解槽的输入电流,进而调节电解槽的有功功率。因此,电网扰动发生时,电制甲醇系统同样可快速调节功率,且由式(10)可知,在频率响应过程中,电制甲醇系统吸收的能量可表示为与同步发电机旋转动能相似的表达式,即

$$\begin{aligned} E_{MeOH} &= \int \frac{V_{MST}}{k} d(1 - \gamma_{MST}) = \\ &= \int \frac{V_{MST} d(1 - \gamma_{MST})}{k \omega_e d\omega_e / p_n^2} \frac{\omega_e}{p_n^2} d\omega_e = \\ &= \int J_{EMPS} \frac{\omega_e}{p_n^2} d\omega_e \quad (12) \end{aligned}$$

式中 J_{EMPS} 定义为电制甲醇系统的虚拟转动惯量。 $\Delta\gamma_{MST} = \gamma_{MST} - \gamma_{MST,0}$, 表示甲醇罐安全系数的变化量。考虑到 $\Delta\gamma_{MST}$ 与电力系统角频率变化量 $\Delta\omega_e$, J_{EMPS} 可

推导为

$$J_{\text{EMPS}} = \frac{V_{\text{MST}} d(1 - \gamma_{\text{MST}})}{k \omega_e d \omega_e / p_n^2} = \frac{p_n^2 V_{\text{MST}}}{k \omega_e} \frac{d(1 - \gamma_{\text{MST}})}{d \omega_e} \approx -\frac{p_n^2 V_{\text{MST}}}{k \omega_e} \frac{\Delta \gamma_{\text{MST}}}{\Delta \omega_e} \quad (13)$$

式中 $\Delta \omega_e$ 为电力系统角频率变化量。

由式(13)可知, 电制甲醇系统的虚拟转动惯量与甲醇罐的安全系数以及电力系统角频率等因素相关, 因此电制甲醇系统的虚拟转动惯量可表示为

$$J_{\text{EMPS}} = \frac{V_{\text{MST}} d(1 - \gamma_{\text{MST}})}{k \omega_e d \omega_e / p_n^2} \frac{\gamma_{\text{MST}_0} J_g \omega_e}{\gamma_{\text{MST}_0} J_g \omega_e} = -J_g \frac{\Delta \gamma_{\text{MST}} \omega_e}{\Delta \omega_e \gamma_{\text{MST}_0}} \frac{2 p_n^2}{2 J_g \omega_e^2} \frac{V_{\text{MST}} \gamma_{\text{MST}_0}}{k} = -J_g h \frac{E_{\text{MeOH}}}{2 E_{k_SG}} \quad (14)$$

其中

$$h = \frac{\Delta \gamma_{\text{MST}} \omega_e}{\Delta \omega_e \gamma_{\text{MST}_0}} \quad (15)$$

式中 h 为甲醇罐安全系数变化率与同步发电机转速变化率的比值。

由式(12)和(14)可以看出, 电力系统发生扰动后, 电制甲醇系统存储的能量 E_{MeOH} 等同于转动惯量为 J_g 、极对数为 p_n 的同步发电机转子所存储的旋转动能, 且通过调节 h 的大小, 即调整甲醇罐安全系数变化率与同步发电机转速变化率的比值, 理论上可虚拟出比等容量同步发电机更大的转动惯量, 从而在短时间进行功率调节, 为电网提供惯性支持, 提高电力系统运行的稳定性。因此定义电制甲醇系统的虚拟惯量为

$$H_{\text{EMPS}} = \frac{E_{\text{MeOH}}}{S_{N_EMPS}} = -\frac{1}{2 p_n^2} \frac{J_{\text{EMPS}} \omega_e^2}{S_{N_EMPS}} = -\frac{\omega_e V_{\text{MST}}}{2 k S_{N_EMPS}} \frac{\Delta \gamma_{\text{MST}}}{\Delta \omega_e} \quad (16)$$

式中 H_{EMPS} 、 S_{N_EMPS} 为电制甲醇系统的虚拟惯量和额定容量。

H_{EMPS} 反映了电制甲醇系统在系统发生扰动时的虚拟惯量响应能力, 由式(16)可知, 与同步发电机的惯量不同, H_{EMPS} 的大小与 $\Delta \gamma_{\text{MST}} / \Delta \omega_e$ 有关, 为时变量, 即电制甲醇系统的惯量与甲醇罐安全系数、电力系统频率等多个因素相关。

2.2 电制甲醇系统虚拟惯量表征

电制甲醇系统虚拟惯量模型引入电网频率微分信号, 通过频率变化率与惯量控制增益, 生成有功功

率参考值, 从而进行功率响应, 电制甲醇系统虚拟惯量模型如图4所示。

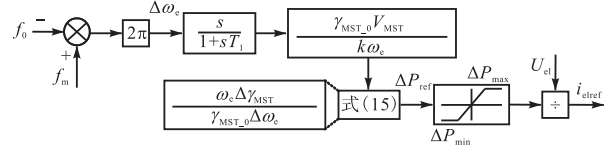


图4 电制甲醇系统虚拟惯量模型

Fig.4 Virtual inertia model for EMPS

由图4可知, 电制甲醇系统有功功率参考信号为

$$\Delta P_{\text{ref}} = \frac{\gamma_{\text{MST}_0} V_{\text{MST}} h s}{k \omega_e (1 + s T_1)} \Delta \omega_e \quad (17)$$

同时可知电制甲醇系统的参考电流与有功功率的关系为

$$i_{\text{ref}} = \frac{\Delta P_{\text{ref}}}{U_{\text{el}}} \quad (18)$$

结合式(9)中甲醇罐安全系数表达式可知, 经滤波处理后, 惯量响应过程中甲醇罐的安全系数变化量为

$$\Delta \gamma_{\text{MST}} = \frac{k U_{\text{el}} s}{1000 V_{\text{MST}} (1 + s T_2)} i_{\text{ref}} \quad (19)$$

式中: V_{MST} 的单位为 L; 1000 为 L 与 mL 的转换系数。

当电力系统发生扰动时, 电制甲醇系统控制模块通过频率变化率与惯量控制增益生成有功功率参考值, 电力电子变换器控制模块通过 ΔP_{ref} 产生电流参考信号 i_{ref} , 进而控制电制甲醇系统的输入电流, 以实现电制甲醇系统的短时功率调节。

由式(17)~(19)可知, 含虚拟惯量的电制甲醇系统传递函数如图5所示。稳态时, $\Delta \omega_e = 0$, $\Delta P_{\text{ref}} = 0$, 电制甲醇系统不进行功率调节。当电力系统发生扰动时, 例如负载突减导致电网频率突增, 此时 $\Delta \omega_e > 0$, 功率参考值 $\Delta P_{\text{ref}} > 0$, 电制甲醇系统增大功率为电网提供惯性支持; 负载突增导致电网频率突减, 此时 $\Delta \omega_e < 0$, 功率参考值 $\Delta P_{\text{ref}} < 0$, 电制甲醇系统减小功率为电网提供惯性支持。

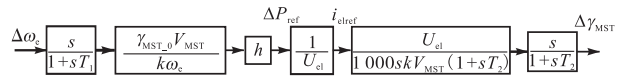


图5 含虚拟惯量的电制甲醇系统传递函数

Fig.5 Transfer function of EMPS with virtual inertia

由图5可知

$$\frac{\Delta \gamma_{\text{MST}}}{\Delta \omega_e} = \frac{\gamma_{\text{MST}_0} h s}{1000 (1 + s T_1) (1 + s T_2) \omega_e} \quad (20)$$

将式(20)代入式(16)可知

$$H_{\text{EMPS}}(s) = \frac{V_{\text{MST}} \gamma_{\text{MST}_0} h}{2000kS_{\text{N_EMPS}}} \frac{s}{(1+sT_1)(1+sT_2)} \quad (21)$$

2.3 电制甲醇系统虚拟惯量时域特性分析

$$k_f = \frac{V_{\text{MST}}}{2000kS_{\text{N_EMPS}}} \quad (22)$$

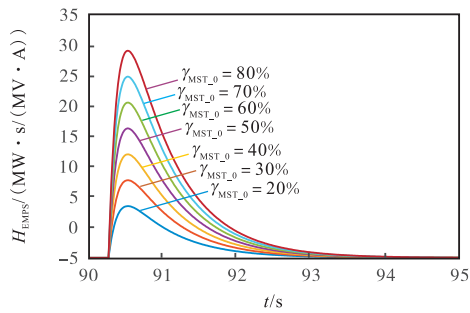
对式(21)进行拉普拉斯反变换,得到电制甲醇系统虚拟惯量时域表达式为

$$H_{\text{EMPS}}(t) = k_f \gamma_{\text{MST}_0} h L^{-1} \left(\frac{s}{(1+sT_1)(1+sT_2)} \right) = k_f \gamma_{\text{MST}_0} h L^{-1} \left(\frac{A}{s+C} + \frac{B}{s+D} \right) = k_f \gamma_{\text{MST}_0} h (Ae^{-Cr} + Be^{-Dr}) \quad (23)$$

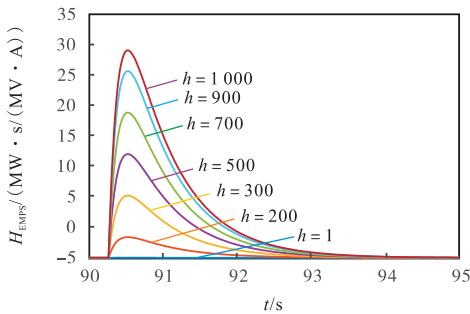
其中

$$\begin{cases} A = 1/[T_1(T_2 - T_1)] \\ B = 1/[T_2(T_1 - T_2)] \\ C = 1/T_1 \\ D = 1/T_2 \end{cases} \quad (24)$$

由式(22)和(23)可知,当 V_{MST} 、 k 、 $S_{\text{N_EMPS}}$ 、 γ_{MST_0} 、 h 的大小确定时, $H_{\text{EMPS}}(t)$ 具有指数变化特性. 因此通过仿真得到电制甲醇系统运行过程中 H_{EMPS} 随 γ_{MST_0} 、 h 变化的特性曲线,如图 6 所示.



(a) $h = 1000$ 时, H_{EMPS} 随 γ_{MST_0} 变化的特性曲线



(b) $\gamma_{\text{MST}_0} = 80\%$ 时, H_{EMPS} 随 h 变化的特性曲线

图 6 H_{EMPS} 与 γ_{MST_0} 、 h 变化的特性曲线

Fig.6 Characteristic curves of H_{EMPS} as a function of γ_{MST_0} and h

由图 6(a)可知, h 一定时,电制甲醇系统虚拟惯量随甲醇产量的增长越来越小,即随甲醇罐安全系数的初始状态减小而减小;由图 6(b)可知,甲醇罐安全系数初始状态不变时,电制甲醇系统虚拟惯量随 h 的增长越来越大,即可通过调节 h 的大小虚拟出比等容量同步发电机更大的转动惯量.

3 电制甲醇系统抗扰动分段控制方法

风储、光储系统通过控制储能系统的充放电功率,实现并网功率的调节,从而虚拟出惯量为电力系统提供惯性支持. 电制甲醇系统与电力系统进行单向功率流通,与风储、光储系统的功率流通特性不同. 结合提出的电制甲醇系统虚拟惯量模型,本文针对电制甲醇系统的运行特性,提出电制甲醇系统抗扰动分段控制方法.

为避免电制甲醇系统运行过程中甲醇罐储能过剩,提高电制甲醇系统运行的安全性,根据甲醇罐的安全系数调整电制甲醇系统的运行功率,定义电制甲醇系统功率控制增益 α_{MST} 为

$$\alpha_{\text{MST}} = \frac{1}{1 + e^{-100(\gamma_{\text{MST}} - 0.1)}} \quad (25)$$

由式(25)可知,电制甲醇系统功率控制增益与电制甲醇系统运行过程中甲醇罐安全系数相关, α_{MST} 特性曲线如图 7 所示. $\gamma_{\text{MST}} > 0.2$ 时,电制甲醇系统处于安全区, α_{MST} 最大为 1; $0 < \gamma_{\text{MST}} \leq 0.2$ 时,电制甲醇系统处于非安全区, α_{MST} 随 γ_{MST} 变化.

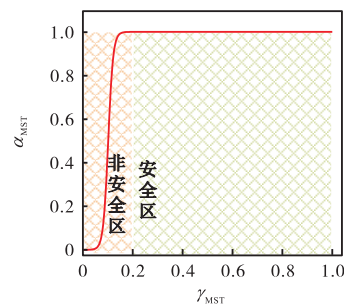


图 7 α_{MST} 特性曲线

Fig.7 Characteristic curve of α_{MST}

电制甲醇系统额定功率运行时,甲醇的制取效率最高. 电制甲醇系统通过调整运行功率为电力系统提供惯量支持时,电制甲醇系统为非额定功率运行,甲醇的制取效率较低. 因此考虑电制甲醇系统运行稳定性与甲醇制取高效性,提出电制甲醇系统抗扰动分段控制方法. 通过电力系统频率偏差,对电制甲醇系统的运行状态进行划分,如图 8 所示. 在 $t_0 < t < t_1$

和 $t_2 < t < t_3$ 时, 电网频率偏差 Δf 大于允许误差 Δf_N , 电网频率偏差 Δf 处在惯量支撑区, 电制甲醇系统通过快速调节运行功率, 在短时间内虚拟出惯量, 为电力系统提供惯性支持; 在其余时间段内, 电网频率偏差 Δf 小于允许误差 Δf_N , 电网频率偏差 Δf 处在非惯量支撑区, 电制甲醇系统额定功率运行, 以最大生产速率制取甲醇。

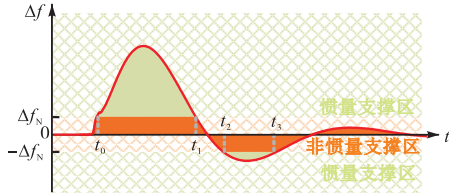


图 8 频率偏差分区示意

Fig.8 Schematic of frequency deviation partition

电制甲醇系统抗扰动分段控制框图如图 9 所示. 首先采集系统频率信号 f_m , 与频率额定值 Δf_0 比较得到电网频率偏差 Δf , 电网频率偏差 Δf 处在非惯量支撑区时, $\Delta \omega_e = 0$, $\Delta P_{ref} = 0$, 此时开关切换为状态 1, 电制甲醇系统以额定功率 P_{el_N} 运行; 当电力系统发生扰动, 且电网频率偏差 Δf 处在惯量支撑区时, 开关切换为状态 2, 此时电制甲醇系统通过虚拟惯量模型, 以功率 $P_{el_N} + \Delta P_{ref}$ 运行, 为保障电制甲醇系统安全运行以及高效率制取甲醇, 电制甲醇系统最大调节功率不大于 ΔP_{max} , 最小调节功率不小于 ΔP_{min} , 扰动消除后, 开关切换为状态 1, 电制甲醇系统仍以额定功率运行, 高效率制取甲醇。

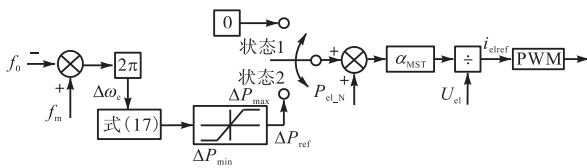


图 9 电制甲醇系统抗扰动分段控制框图

Fig.9 Block diagram of disturbance-resistant segmented control of EMPS

4 仿真验证

以某海岛的电网结构为例, 利用 MATLAB/Simulink 仿真软件建立如图 10 所示的电制甲醇并网系统. 系统包括一台额定功率为 150 kW 的永磁同步风力发电机组, 额定风速为 10 m/s, 通过背靠背变换器并网; 电制甲醇系统包括一台额定功率为 90 kW 的甲醇电解槽与体积容量为 0.015 m^3 的甲醇储存罐, 电制甲醇系统通过 DC/DC 变换器与 DC/AC 变换器

并入交流电网。

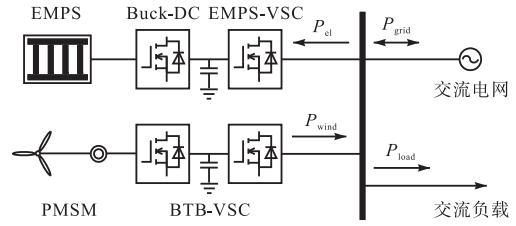


图 10 电制甲醇并网系统仿真结构

Fig.10 Simulation structure of grid-connected electro-methanol production system

如图 10 所示, 电制甲醇并网系统的实际运行过程中, 交流电网发电机中储存着大量的转动惯量, 交流负载的负荷变化以及实际风速变化时, 无法及时调节发电功率, 抑制电网频率波动. 因此, 通过多运行工况对所提出的电制甲醇系统抗扰动分段控制方法进行验证。

4.1 负载突变工况

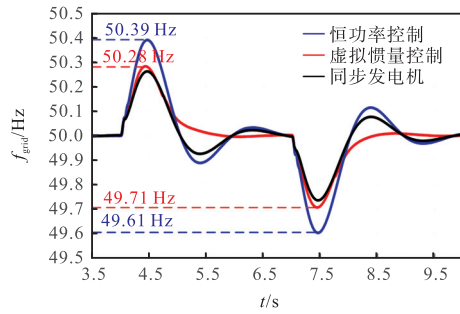
在 $t = 4 \text{ s}$ 时进行交流负载负荷突减, 在 $t = 7 \text{ s}$ 时进行交流负载负荷突增, 模拟电力系统运行过程中的负荷扰动. 同时对比无虚拟惯量模型, 即恒功率控制, 以及等容量同步发电机对扰动的响应情况, 仿真结果如图 11 所示。

由图 11(a)所示, 电力系统受到负载扰动时, 所提出的虚拟惯量模型提供的惯量支持与等容量同步发电机提供的惯量支持效果相同, 且恢复阶段更加平缓. 相比于恒功率控制, 在负荷突减时, 电网频率幅值由 50.39 Hz 减小到 50.28 Hz, 幅值变化量减小了 28.21%; 在负荷突增时, 电网频率幅值由 49.61 Hz 增大到 49.71 Hz, 幅值变化量减小了 25.64%. 由图 11(b)可知, 在负荷突变时, 所提出的虚拟惯量模型可快速调节电制甲醇系统的运行功率, 在短时间内进行功率调节, 为电网提供惯性支持. 由图 11(c)可知, 在电制甲醇系统运行过程中, 甲醇的生产速率与甲醇罐的安全系数受电制甲醇系统运行功率的影响, 电制甲醇系统额定功率运行时, 甲醇的生产速率最大, 同时甲醇罐安全系数变化率最大; 电制甲醇系统变功率运行时, 甲醇的生产速率降低, 甲醇罐安全系数变化率也有所减小。

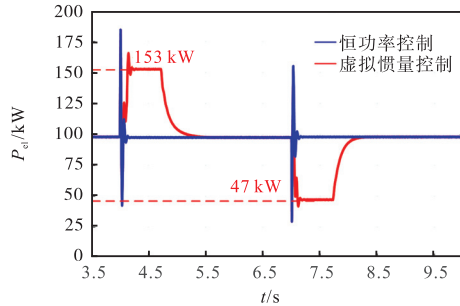
4.2 风速突变工况

在 $t = 4 \text{ s}$ 时进行风速突增, 在 $t = 7 \text{ s}$ 时进行风速突减, 模拟电力系统运行过程中的风速扰动, 同样对比无虚拟惯量模型, 以及等容量同步发电机对扰动的响应情况, 仿真结果如图 12 所示。

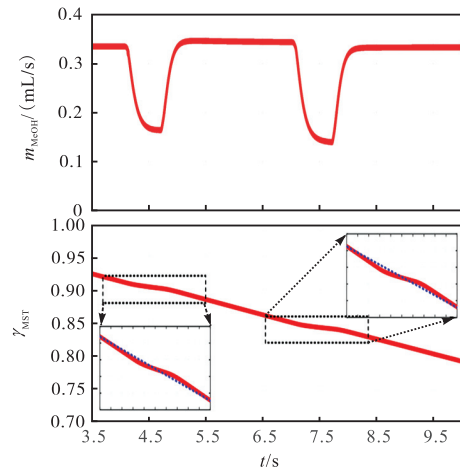
由图 12(a)所示, 电力系统受风速扰动时, 所提



(a) 电网频率响应



(b) 电制甲醇系统运行功率



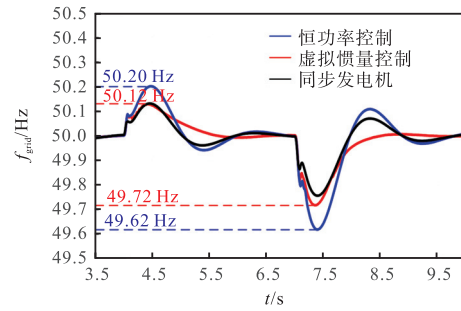
(c) 电制甲醇系统运行状态

图 11 负载变化动态响应

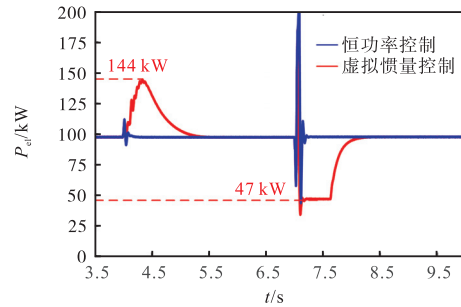
Fig.11 Dynamic response under load variation

出的虚拟惯量模型提供的惯量支持与等容量同步发电机提供的惯量支持效果相同,且恢复阶段更加平缓. 相比于恒功率控制,在风速突增时,电网频率幅值由 50.20 Hz 减小到 50.12 Hz,幅值变化量减小了 40.00%;在风速突减时,电网频率幅值由 49.62 Hz 增大到 49.72 Hz,幅值变化量减小了 26.31%. 由图 12(b)可知,在风速突变时,所提出的虚拟惯量模型可以快速调节电制甲醇系统的运行功率,为电网提供惯性支持. 由图 12(c)可知,电制甲醇系统额定功率运行时,甲醇的生产速率最大,同时甲醇罐的安全系数变化率最大;电制甲醇系统变功率运行时,甲醇的生产速率降低,甲醇罐的安全系数变化率也有所减小.

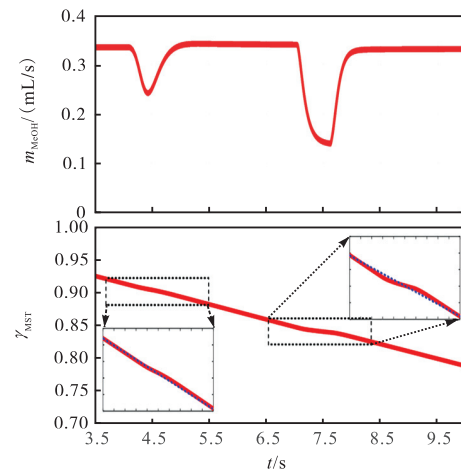
综上所述,稳态时电制甲醇系统以额定功率运行,高效率制取甲醇;电力系统发生扰动时,电制甲醇系统根据提出的虚拟惯量模型,像等容量同步发电机一样在短时间内进行功率调节,为电力系统提供短时惯性支持,抑制电网频率扰动,提高电力系统运行的稳定性,扰动消除后,电制甲醇系统仍以额定功率运行,从而验证所提出电制甲醇系统抗扰动分段控制方法的有效性.



(a) 电网频率响应



(b) 电制甲醇系统运行功率



(c) 电制甲醇系统运行状态

图 12 风速变化动态响应

Fig.12 Dynamic response under wind speed variation

5 结 论

随着大量新能源系统通过电力电子变换器并网,

电力系统正逐步转化为高度电力电子化的新型电力系统,同时,电力系统的惯性随之减小,一定程度上干扰了电力系统的稳定运行。

针对上述问题,建立电制甲醇系统的虚拟惯量模型,并提出电制甲醇系统抗扰动分段控制方法,通过电力系统频率偏差划分电制甲醇系统的运行模态,即在电网受到扰动时,电制甲醇系统快速调节运行功率为电网提供短时惯性支持;在电网稳定运行时,电制甲醇系统以额定功率运行,高效率制取甲醇,保障电制甲醇系统的安全运行,有效提高电力系统运行的稳定性。具体包括以下结论。

(1) 甲醇电解槽的输入功率与输入电流存在线性关系,同时甲醇的生产速率与电解槽输入功率相关,可通过控制电解槽的输入电流调节电解槽的有功功率,从而在短时间内进行功率调节。

(2) 对电制甲醇系统进行建模分析,并通过表征同步发电机的运行特征,提出电制甲醇系统虚拟惯量模型,建立电网频率与甲醇罐安全系数之间的转换关系,通过调节甲醇罐安全系数变化率与同步发电机转速变化率的比值,使无转动惯量的电制甲醇系统虚拟出转动惯量。

(3) 所提出的电制甲醇系统抗扰动分段控制方法在电力系统受到不同扰动时,均能快速对电制甲醇系统进行功率调节,在短时间内为电力系统提供惯性支持;在电力系统稳定运行时,使电制甲醇系统以额定功率运行,高效率制取甲醇。

参考文献:

- [1] 张云州, 张 宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 1-11.
Zhang Yunzhou, Zhang Ning, Dai Hongcai, et al. Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 1-11 (in Chinese).
- [2] 郑富辉. 甲醇作为清洁能源的影响与可持续发展分析[J]. 投资与合作, 2024(4): 71-73.
Zheng Fuhui. Analysis of the impact and sustainable development of methanol as a clean energy source[J]. Investment and Cooperation, 2024(4): 71-73 (in Chinese).
- [3] 陈文倩, 辛小南, 程志平. 基于虚拟同步发电机的光储并网发电控制技术[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增2): 538-545.
Chen Wenqian, Xin Xiaonan, Cheng Zhiping. Control of grid-connected of photovoltaic system with storage based on virtual synchronous generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(Suppl 2): 538-545 (in Chinese).
- [4] 崔 健, 房建军. 虚拟直流电机技术参数分析及虚拟惯量自适应控制[J]. 电源学报, 2022, 20(6): 192-202.
Cui Jian, Fang Jianjun. Parameters analysis and virtual inertia adaptive control of virtual DC motor technique[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(6): 192-202 (in Chinese).
- [5] 卢 军, 杨沛豪, 何凯琳. 新能源储能微电网惯量支撑性能研究[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 182-191.
Lu Jun, Yang Peihao, He Kailin. Research on inertia support performance of new energy storage micro-grid[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 182-191 (in Chinese).
- [6] 王 毅, 陈 中, 周 涛, 等. 计及新能源虚拟惯量的电力系统最低惯量评估[J]. 电气工程学报, 2024, 19(1): 254-260.
Wang Yi, Chen Zhong, Zhou Tao, et al. Evaluation of minimum inertia of power system considering virtual inertia of renewable energy[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(1): 254-260 (in Chinese).
- [7] 杜 威, 姜齐荣, 陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 26-31, 36.
Du Wei, Jiang Qirong, Chen Jiaorui. Frequency control strategy of distributed generations based on virtual inertia in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 26-31, 36 (in Chinese).
- [8] 李世春, 邓 蕊, 薛臻瑶, 等. 基于虚拟惯量计算的储能虚拟惯量补偿控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(11): 114-121.
Li Shichun, Deng Rui, Xue Zhenyao, et al. Virtual inertia compensation control method for energy storage device based on calculation of virtual inertia[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(11): 114-121 (in Chinese).
- [9] 李世春, 张业丽, 刘颂凯, 等. 跟网型电化学储能虚拟惯性常数的常数化计算方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(20): 149-158.
Li Shichun, Zhang Yeli, Liu Songkai, et al. Constantized calculation method of virtual inertia constant for grid-following electrochemical energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(20):

- 149-158 (in Chinese).
- [10] Wang T, Jin M X, Li Y D, et al. Adaptive damping control scheme for wind grid-connected power systems with virtual inertia control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3902-3912.
- [11] 朱晓荣, 蔡 杰, 王 毅, 等. 风储直流微网虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 49-58.
- Zhu Xiaorong, Cai Jie, Wang Yi, et al. Virtual inertia control of wind-battery-based DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 49-58 (in Chinese).
- [12] 张祥宇, 胡剑峰, 付 媛, 等. 风储联合系统的虚拟惯量需求与协同支撑[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 672-685.
- Zhang Xiangyu, Hu Jianfeng, Fu Yuan, et al. Virtual inertia demand and collaborative support of wind power and energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 672-685 (in Chinese).
- [13] 张冠锋, 杨俊友, 王海鑫, 等. 基于虚拟同步机技术的风储系统协调调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(增 1): 83-92.
- Zhang Guanfeng, Yang Junyou, Wang Haixin, et al. Coordinated frequency modulation control strategy of wind farm-storage system based on virtual synchronous generator technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(Suppl 1): 83-92 (in Chinese).
- [14] 张祥宇, 杨 黎, 朱晓荣, 等. 光储发电系统的虚拟转动惯量控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 109-115.
- Zhang Xiangyu, Yang Li, Zhu Xiaorong, et al. Virtual rotational inertia control of PV generation system with energy storage devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 109-115 (in Chinese).
- [15] Huang X, Wang K Y, Li G J, et al. Virtual inertia-based control strategy of two-stage photovoltaic inverters for frequency support in islanded micro-grid[J]. Electronics, 2018, 7(11): 340.
- [16] 张常友, 朱作滨. 基于储能协调的光储微网 VSG 控制策略研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1): 228-234.
- Zhang Changyou, Zhu Zuobin. Research on VSG control strategy of optical storage microgrid based on energy storage coordination[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(1): 228-234 (in Chinese).
- [17] Dozein M G, de Corato A M, Mancarella P. Virtual inertia response and frequency control ancillary services from hydrogen electrolyzers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 38(3): 2447-2459.
- [18] 冯 沛, 余会明, 聂工哲, 等. 基于电流型虚拟同步机控制的电解制氢负荷主动调频策略[J]. 现代电力, 2024, 41(6): 1017-1021.
- Feng Pei, Yu Huiming, Nie Gongzhe, et al. Active frequency regulation strategy for electrolytic hydrogen production load based on current-type virtual synchronous machine control[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(6): 1017-1021 (in Chinese).
- [19] 代灵英, 苏永庆, 古铭岚, 等. C-Cu₂O 复合电极用于电化学还原 CO₂ 制甲醇[J]. 应用化工, 2022, 51(7): 1946-1949.
- Dai Lingying, Su Yongqing, Gu Minglan, et al. C-Cu₂O composite electrode using for electrochemical reduction of CO₂ to methanol[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(7): 1946-1949 (in Chinese).

(责任编辑: 孙立华)