

基于构网型储能双虚拟电机控制的风电制氢系统

贺彬¹, 任永峰¹, 孟庆天^{1,2}, 云平平³, 刘会强², 米玥³

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010080; 2. 内蒙古电力集团有限责任公司内蒙古电力科学研究院, 呼和浩特 010020; 3. 内蒙古国天新能源科技有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 风电制氢作为一种全周期零碳排放的制氢方式, 是实现碳中和目标、促进能源结构绿色转型的重要途径。针对风电制氢系统接入弱电网下主动支撑能力弱的问题, 提出基于构网型储能虚拟同步机和虚拟直流电机的双虚拟电机控制策略, 有效增强风电制氢系统电压、频率主动支撑能力, 也为制氢系统直流母线提供可靠的惯量、阻尼支撑。基于小信号方法分析了两种控制策略中转动惯量和阻尼系数对系统稳定性及动态响应的影响情况。最后通过 SIMULINK 搭建的风-氢-储仿真模型进行验证, 结果显示所提策略可为风电制氢系统接入弱电网提供可靠的电压、频率支撑, 也能较好地改善制氢系统直流母线电压波动情况。

关键词: 风电制氢系统; 构网型 VSG; 虚拟直流电机; 弱电网; 主动支撑

Hydrogen Production System by Wind Power Based on Dual Virtual Motor Control for Grid-forming Energy Storage

HE Bin¹, REN Yongfeng¹, MENG Qingtian^{1,2}, YUN Pingping³, LIU Huiqiang², MI Yue³

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;

2. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Inner Mongolia Power Group Co., Ltd., Hohhot 010020, China;

3. Inner Mongolia GuoTian New Energy Technology Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract: Hydrogen production by wind power is a method with characteristics of full-cycle and zero-carbon emission hydrogen production, which is an important way to achieve the goal of carbon neutrality and promote the green transformation of the energy structure. In accordance with the problems of the weak active support capability of a hydrogen production system by wind power connected to the weak grid, a dual virtual generator control strategy based on a grid-forming energy storage virtual synchronous generator strategy and the virtual DC machine strategy are adopted in the hydrogen production system by wind power in this paper, which enhances the active support capability of voltage and frequency of the system effectively, as well as provides a reliable inertia and damping support for the DC bus of the hydrogen production system. In addition, the effects of rotational inertia and damping coefficients on the stability and dynamic response of the system are analyzed based on the small-signal method for both control strategies. At last, the wind-hydrogen-storage simulation model constructed by SIMULINK is verified, and the results show that the dual virtual generator control strategy can provide reliable voltage and frequency support for the hydrogen production system by wind power which connects to the weak grid, and improve the DC bus voltage fluctuation of the hydrogen production system better.

Key words: hydrogen production system by wind power; grid-forming VSG; virtual DC machine; weak grids; active support

0 引言

面对能源安全与环境问题的双重压力, 大力发

展绿色可再生能源已经成为全球能源战略发展的共识^[1]。特别是风力发电技术的快速革新, 正积极促进风电产业向高效率、低成本发展方向推进, 为加速风电代替化石能源进程、实现能源高质量转型提供坚实的支持^[2]。氢能作为新型绿色低碳能源与风力发电呈现出高度契合的关系^[3], 将风力发电产生的电能用于电解水制氢, 实现能源高效利用和存储, 为电力能源需求与消纳提供稳定可靠的解决方案。

基金资助项目: 国家自然科学基金(52367022; 51967016); 内蒙古自治区重点研发和成果转化项目(2023YFHH0077); 内蒙古自治区科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目(2023JBGS0013)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (52367022, 51967016), Key R&D and Achievement Transformation Projects in Inner Mongolia Autonomous Region (2023YFHH0077), Inner Mongolia Autonomous Region Science and Technology Innovation Major Demonstration Project “Unveiling and Commanding” Project (2023JBGS0013).

欧盟在 2022 年通过的可再生能源指令(RED II)中明确规定, 生产绿氢所需电力需完全来自可再生能源发电系统^[4]。与此同时, 中国也相继出台了一系列关于氢能高质量发展的相关政策^[5], 以推动绿色可再生能源与制氢技术大规模、高质量、一体化发展, 使氢能真正成为能源结构转型过程中的关键力量。

随着氢能高质量发展政策陆续出台, 可再生能源与制氢系统之间的互通互联也愈发紧密。风力发电系统与电解制氢系统之间均通过电力电子变换器相连接。变换器本身具有快速响应特性^[6], 但却缺乏类似同步机组的阻尼、惯量的支撑。风电功率波动及负载突变所导致的瞬变电压、电流冲击会直接影响系统的稳定运行^[7], 降低制氢系统的工作效率, 严重时甚至会导致 AEL 设备停机。这也成为风-氢-储系统稳定控制的重点和难点。基于何种控制策略方式增强风-氢-储系统电压、频率主动支撑能力, 同时提升制氢系统的阻尼和惯性, 逐步改善系统稳定性和可控性是当下风电制氢领域融合发展的重点研究方向之一^[8-9]。

为保证风-氢-储系统的协调稳定控制, 有研究者通过制定合理的运行策略以实现系统稳定运行。综合考虑风-氢系统整体规模及运营模式, 文献[10]提出基于随机对偶动态整数规划的风-氢多阶段动态规划算法, 能在多种不确定条件下实现系统科学安排与稳定运行。为提升风-氢-储系统的灵活运行能力, 文献[11]建立了风-氢-储多目标优化模型, 并在电碳气绿证等多种联合交易机制下验证了系统的供能稳定性。科学合理的运行策略能够有效增强系统的灵活性, 但却未从本质上解决源荷波动给系统带来的负面影响。文献[12]采用储能电池-氢储能的混合储能方式合理优化光-氢系统的资源配置, 以期提高光-氢系统的协调运行能力。关于氢负荷波动的不确定性给系统带来的影响, 文献[13]通过模型预测控制实时滚动优化的方式提升新能源发电-制氢-氢负荷间的协调配合能力。

优化算法在一定程度上能够提高风-氢-储系统的工作效率, 但算法本身无法从根本上增强系统的稳定控制能力。相较而言, 基于储能系统并采用先进的控制策略能够提供稳定的电力供给, 平衡源荷间功率波动^[14], 大幅度提高风-氢-储系统的自适应能力和可靠性。文献[15]构建了离网型风电、光伏-制氢储氢-氢燃料电池-蓄电池体系, 采用模型预测控制在线实时平衡系统功率。文献[16]基于混合储

能系统模糊功率分配的方法实现对孤岛型风光制氢系统的协调控制。此外, 可再生能源制氢系统的稳定运行还依赖于系统自身的动态频率响应特性。文献[17]构建了风电制氢系统的动态频率响应模型, 设计下垂控制器为风-氢系统提供可靠的频率支撑。文献[18]将风电、电解槽、燃料电池及超级电容耦合于直流母线进行能量管理以期解决系统响应延迟的问题。文献[19]将风-光-氢-储共同耦合于直流侧, 通过网侧虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)方法实现能量管理系统的协调配合。但随着可再生能源发电系统及制氢系统规模逐渐增大, 将电解槽耦合在可再生能源发电系统直流侧的可行性仍需进一步考虑。

实际工程中的大容量风电机组均建设在偏远地区, 而偏远地区输电线路长、短路容量小、线路阻抗高等因素均表现出明显的弱电网特性。系统负荷波动过程中所产生的瞬时电压、频率波动会严重加剧风-氢-储系统的不稳定性, 影响整个系统的运行效率。因此, 本文提出构网型 VSG 和虚拟直流电机(virtual DC machine, VDCM)的双虚拟电机控制方法以期提升风-氢-储系统的协调运行能力。两种策略各自独立运行, 在系统出现功率波动时, 储能系统采用构网型 VSG 策略为系统提供可靠的有功、无功功率支撑; 在电解槽投入/切除运行时, 储能系统采用 VDCM 策略为制氢系统提供额外的惯量、阻尼支撑, 改善制氢系统直流母线的动态响应能力。最后通过小信号模型及 MATLAB/SIMULINK 搭建的风-氢-储仿真模型验证了所提控制策略的有效性。

1 风-氢-储系统精细化建模

本章分别构建了 6.5 MW 半直驱风电机组(Hybrid driven-permanent magnet synchronous generators, HD-PMSG)、实际工程中常用的碱性电解槽(alkaline electrolyzer, AEL)模型及构网型储能的精细化模型, 准确反应风-氢-储各单元工作状态, 其系统的拓扑结构如图 1 所示。

1.1 6.5MW HD-PMSG 建模及控制

HD-PMSG 的拓扑结构如图 1 所示, 除增设齿轮箱外, HD-PMSG 中还含有两套相同且对称的 Y 型三相绕组, 二者采用并联的连接方式, 其匝数和参数完全相同且均通过背靠背变换器向电网传输功率^[20]。两套绕组在空间上相差一定电角度 γ , 以保

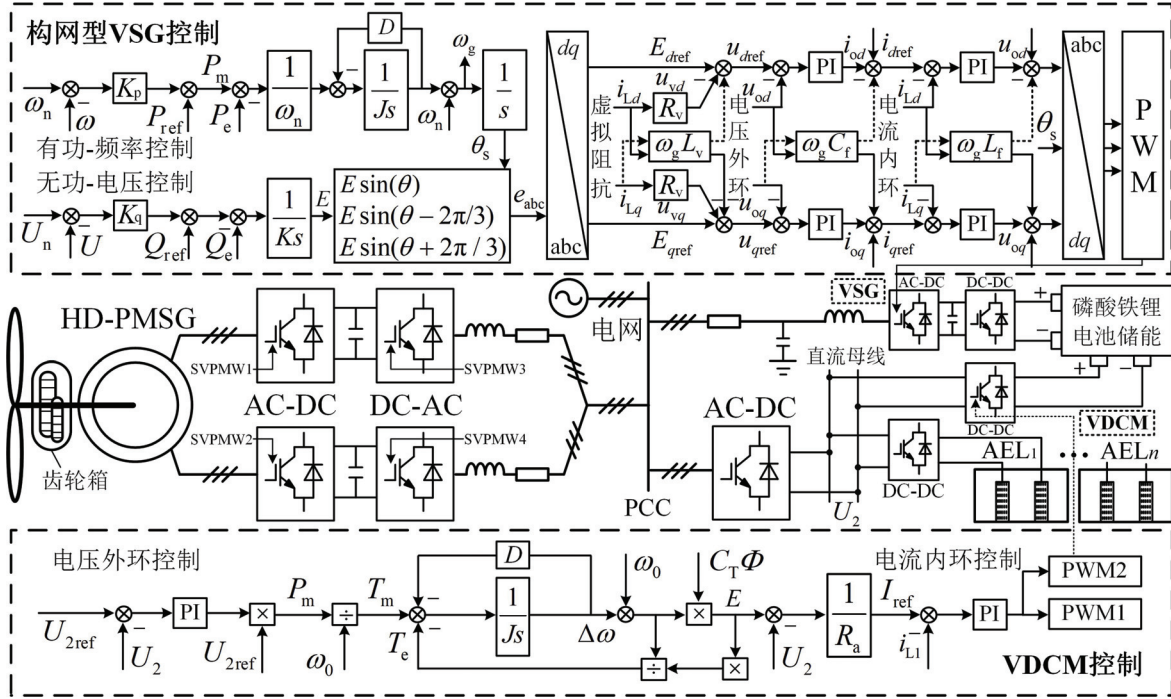


图1 风-氢-储系统拓扑结构及控制策略

Fig.1 Topology structure and control strategy of wind-hydrogen-storage system

证两套绕组获得良好的控制效果及运行特性。正常运行时, 两套绕组相互独立且共同承担 HD-PMSG 功率^[21], 电压电流关系如式(1)所示, 其中 $i_{s1} = i_{s2}$:

$$\begin{cases} u_s = u_{s1} = u_{s2} \\ i_s = i_{s1} + i_{s2} \end{cases} \quad (1)$$

六相静止坐标系下 HD-PMSG 电压方程为:

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (2)$$

磁链方程:

$$\Psi_s = L_s i_s + F_s(\theta) \psi_f \quad (3)$$

式中: u_s 、 i_s 、 Ψ_s 分别为定子绕组相电压(V)、相电流(A)及磁链(Wb); ψ_f 为风电机永磁体磁链; θ 为磁极轴线与 A 相轴线夹角(rad); R_s 、 L_s 、 $F_s(\theta)$ 分别为电阻系数矩阵(Ω)、电感系数矩阵(H)及磁链系数矩阵; 各参数具体形式见附录 A 所示。

将六相静止坐标系转换到 dq 坐标系下以简化系统控制过程, dq 坐标系下 HD-PMSG 电磁转矩方程可表示为:

$$T_{e,i} = \frac{3}{2} n_p (\psi_f i_{q,i} + (L_d - L_q) i_{d,i} i_{q,i}) \quad (4)$$

式中: $T_{e,i}$ 表示第 $i(i=1, 2)$ 套绕组转矩; n_p 表示电机极对数; $L_d = L_{ls} + 1.5L_{ad}$, $L_q = L_{ls} + 1.5L_{aq}$, L_{ls} 为定子绕组漏感; L_{ad} 和 L_{aq} 分别为 d 、 q 轴自感; $i_{d,i}$, $i_{q,i}$ 分别为第 $i(i=1, 2)$ 套绕组 d 、 q 轴电流。

机械方程:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \sum_{i=1}^2 T_{e,i} - T_M \quad (5)$$

式中: J 表示风机转动惯量; ω_m 表示风电机机械角速度; T_M 表示机械转矩。

HD-PMSG 两套绕组在空间上相差 30° 电角度, 控制策略如图 2。

为验证所建模型的准确性, 结合附录 A 表 A1 相关参数对变风速下 HD-PMSG 进行仿真测试, 仿真运行结果见附录 B 图 B1 所示。

1.2 构网型储能等效建模

结合磷酸铁锂电池工作特性将构网型储能简化表示为具有低串联阻抗的电压源形式, 其等效结构如图 3, 结合基尔霍夫定律可得电池内部电动势与内阻之间的关系式为:

$$\begin{cases} U_{LB} = U_{oc} - R_o I_{LB} - U_c \\ I_{LB} = C_{Lp} \frac{dU_c}{dt} + \frac{U_c}{R_{Lp}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_{Lp} 、 R_{Lp} 是模拟锂电池电压渐变特性的极化电容和电阻; R_o 是反应电池电压突变特性的串联内阻; U_{LB} 、 U_{oc} 、 I_{LB} 分别为单体电池端电压、开路电压及放电电流; U_c 为极化电容电压。

θ_{ref} 、 U_{mref} 分别为构网型变流器输出电压相位和幅值的参考值; Z_o 、 Z_g 是变流器及电网的等效阻

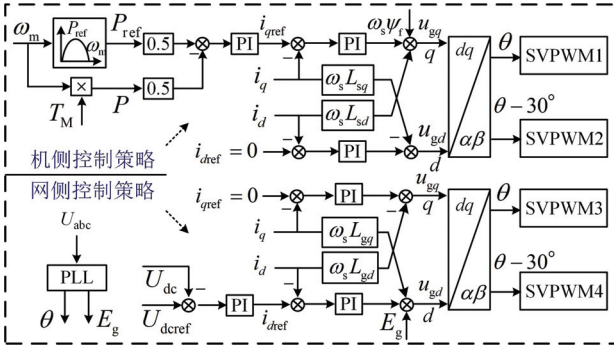


图2 HD-PMSG 双绕组控制策略

Fig.2 Double-winding control strategy for HD-PMSG

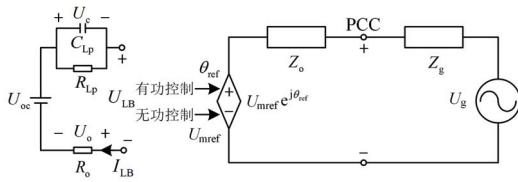


图3 构网型储能等效电路

Fig.3 Equivalent circuit for grid-forming energy storage

抗；由此可以看出构网型储能是通过控制输出口电压实现功率调节^[22]。为验证所建模型的准确性，结合附录 A 表 A2 相关参数，对构网型储能进行放电测试，仿真运行结果见附录 B 图 B2 所示。

1.3 AEL 等效能耗建模

本文构建的 AEL 等效能耗模型由若干个独立电解小室通过串并联方式构成，旨在隔离电极避免短路情况出现，进而优化电解液流动方式，保证制氢过程中电化学反应的安全稳定运行。其等效电路如图 4。

电解小室电压 U_{cell} 由可逆过电势和不可逆过电势两部分组成，其中可逆过电势包含标准过电势 U_{sta} 和可变可逆过电势 U_{var} ；不可逆过电势包含活化过电势 U_{act} 、电解液欧姆过电势 U_{ele} 、电极欧姆过电势 U_{el} 、隔膜欧姆过电势 U_{mem} 和浓差过电势 U_{diff} 5 部分^[23]，AEL 具体参数见附录 A 表 A3。

$$U_{cell} = U_{sta} + U_{var} + U_{act} + U_{ele} + U_{el} + U_{mem} + U_{diff} \quad (7)$$

(1) 标准可逆过电势 U_{sta}

标准可逆过电势 U_{sta} 表示标准状态下该反应吉布斯自由能的变化情况，受到温度变化的影响^[24]，通过实验数据拟合，标准可逆过电势为式(8)：

$$U_{sta} = 1.50342 - 9.956 \times 10^{-4} T + 2.5 \times 10^{-7} T^2 \quad (8)$$

式中：T 表示温度。

(2) 可变可逆过电势 U_{var}

与标准可逆过电势相比，可变可逆过电势 U_{var}

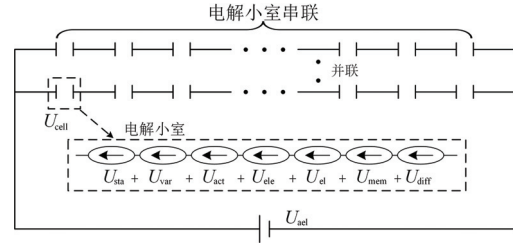


图4 AEL 稳态能耗等效电路

Fig.4 Equivalent circuit for steady-state energy consumption of AEL

更能直接反映实际条件下电解小室的过电势，主要与温度、压力的变化有关^[25]，可表示为：

$$U_{var} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2O}^* (p - p_{H_2O})^{1.5}}{p_{H_2O}} \quad (9)$$

$$p_{H_2O}^* = T^{-3.4159} \cdot \exp(37.043 - 6275.7/T) \quad (10)$$

$$p_{H_2O} = T^{-3.498} \cdot \exp(37.93 - 6426.32/T) \cdot \exp(0.016 - 0.13m + 0.1933m^{0.5}) \quad (11)$$

$$m = w \cdot \frac{183.1221 - 0.56845T + 984.5679 \times \exp(w/115.96277)}{5610.5} \quad (12)$$

式中： $p_{H_2O}^*$ 为纯水蒸发压力； p_{H_2O} 为电极附近氢气和氧气的压力； p 为制氢系统压力； R 为气体常数； F 为法拉第常数； m 为摩尔质量； w 为电解液浓度。

(3) 活化过电势 U_{act}

活化过电势 U_{act} 是电极发生电子转移过程中突破能量壁垒产生的电位差^[25]，可表示为：

$$U_{act} = \frac{RT}{\alpha_k F} \operatorname{arcsinh} \frac{j}{j_k} \quad (13)$$

式中： α_k 为电解槽阳极、阴极电荷转移系数； j 为电流密度； j_k 为阳极、阴极交换电流密度。

(4) 电解液欧姆过电势 U_{ele}

由于电解液内部电解质浓度分布不均匀，电解质离子在迁移过程产生的电势差称为电解液欧姆过电势 U_{ele} ^[26]，可表示为：

$$U_{ele} = \frac{j \cdot l}{\sigma_{KOH}} \quad (14)$$

$$\sigma_{KOH} = -204w - 0.28w^2 + 0.5332wT + 20730 \frac{w}{T} + 0.1043w^3 - 0.00003w^2T^2 \quad (15)$$

式中： l 为氢氧根离子传递长度； σ_{KOH} 为电解液电导率。

(5) 电极欧姆过电势 U_{el}

电极与电解质接触时表面会发生吸附现象从

而在电极两侧产生电势差, 主要与电极电导率、面积有关^[27], 可表示为:

$$U_{el} = \rho_k \frac{L_k}{A} j \quad (16)$$

式中: ρ_k 为阳极、阴极有效电阻率; L_k 为阳极、阴极厚度; A 为电极面积。

(6) 隔膜欧姆过电势 U_{mem}

隔膜欧姆过电势是隔膜选择性阻挡隔膜两侧离子移动而形成的电势差, 其主要影响因素包括隔膜厚度及隔膜面积等^[25], 可表示为:

$$U_{mem} = \frac{0.06 + 80e^{-T/50}}{10000S_m} j \quad (17)$$

式中: S_m 为隔膜面积。

(7) 浓差过电势 U_{diff}

为准确反应电解液或隔膜两侧存在的浓度梯度所产生的电势差^[23], 浓差过电势 U_{diff} 可表示为:

$$U_{diff} = \frac{RT}{2\beta F} \ln\left(1 + \frac{j}{j_{lim}}\right) \quad (18)$$

式中: β 为浓差过电势常数; j_{lim} 为扩散极限电流。

根据式(7)—(18)模拟恒压条件下 AEL 不同温度下 U - j 输出特性曲线如图 5, 详细参数见附录 A。当电流=0 时, 小室可逆过电势 U_{rev} 为 1.452 V, 这是由于可逆过电势仅受温度、压力及活度等因素的影响。随着电流密度逐渐增加, 电解小室电压逐渐减小, 可见适当降低电解槽温度可降低一定能量损耗, 有利于改善电解槽的工作特性。

AEL 接口电压可表示为式(19)。

$$U_{AEL} = NU_{cell} \quad (19)$$

式中: N 表示电解槽串联的电解小室个数。AEL 电解槽产氢速率可表示为式(20)。

$$n_{H_2} = \eta_F \frac{NI_{AEL}}{2F} \quad (20)$$

$$\eta_F = a_1 \exp\left(\frac{a_2 + a_3 T}{I_{AEL}/A_{cell}} + \frac{a_4 + a_5 T}{(I_{AEL}/A_{cell})^2}\right) \quad (21)$$

式中: I_{AEL} 为电解槽接口电流; A_{cell} 为小室电极面积; $a_k(k=1, 2, 3, 4)$ 为法拉第效率系数。

为验证所建模型的准确性, 分别在 1 s、2 s 时分别投入运行 500 Nm³/h 和 200 Nm³/h 的 AEL, 其功率、电流及制氢量仿真运行结果见附录 B 图 B3。

2 构网型储能双虚拟电机控制策略

考虑到大容量风电机组均建设在偏远地区^[28], 其系统末端通常接入 10 kV 或 35 kV 电网, 输电线路较长, 线路阻抗较高, 负荷波动时容易产生较大

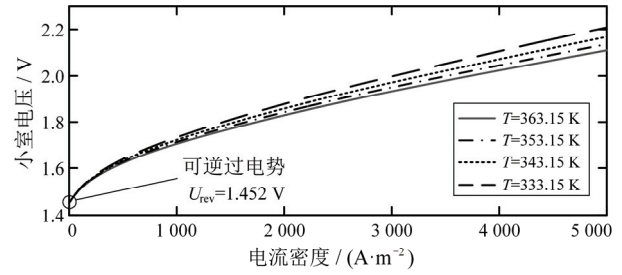


图 5 多温度下碱性电解槽 U - j 特性曲线

Fig.5 U - j curve of AEL at different operating temperatures

的电压、频率波动, 表现出明显的弱电网特性。此外, 风-氢-储系统中所连接的电力电子变换器属于完全静止的电力转换设备, 导致系统缺失一定的阻尼和惯性。因此, 本文提出构网型储能 VSG 和 VDCM 的双虚拟电机控制策略, 两种控制策略各自独立运行, 为系统提供可靠的功率、惯量和阻尼的支撑。

2.1 构网型 VSG 控制策略

构网型 VSG 控制策略是将同步发电机的机械特性方程与电磁特性方程引入到储能 DC/AC 变流器当中, 并通过有功-频率控制环节与无功-电压两个环节实现对系统频率、电压主动支撑^[29], 具体控制框图见图 1 构网型 VSG 策略部分。构网型 VSG 机械部分模拟了同步发电机转子阻尼和惯量特性:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega_n - \omega) \\ \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_n - \omega \end{cases} \quad (22)$$

式中: J 为虚拟转动惯量; T_m 、 T_e 分别为虚拟机械转矩及虚拟电磁转矩, $T_m = P_m / \omega$, $T_e = P_e / \omega$, P_m 、 P_e 分别为机械功率与电磁功率; D 为阻尼系数; θ_s 、 ω_n 、 ω 分别为电压相位、机械角速度和电网同步角速度。为满足系统实时动态调整频率需求, 将有功-频率环节表示为下垂控制形式:

$$P_m = P_{ref} + K_p(\omega_n - \omega) \quad (23)$$

式中: K_p 为下垂系数; P_{ref} 为有功参考功率。

构网型 VSG 电磁部分模拟了同步发电机定子电压电流关系, 可表示为:

$$\mathbf{e} = \mathbf{u} + R_s \mathbf{i}_L + L_s \frac{d\mathbf{i}_L}{dt} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{e} = [e_a, e_b, e_c]$ 为定子感应电动势; $\mathbf{u} = [u_a, u_b, u_c]$ 为端口电压; $\mathbf{i}_L = [i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}]$ 为定子电流; R_s 、 L_s 为定子电阻与电感值。为模拟励磁调压过程, 无功-电压环节可表示为:

$$K \frac{dE}{dt} = Q_{\text{ref}} + K_q(U_n - U) - Q_e \quad (25)$$

式中: K 为积分系数; E 为电动势幅值; K_q 为无功电压下垂系数; Q_{ref} 为无功参考功率; Q_e 为 VSG 输出无功功率; U_n 为额定电压值、 U 为构网型 VSG 输出电压。

将虚拟阻抗环节引入构网型 VSG 控制中以期提升功率分配精度, 经过虚拟阻抗环节 L_v 输出到电压环的参考值见式(26):

$$\begin{cases} u_{vd} = R_v i_{Ld} - \omega_g L_v i_{Lq} \\ u_{vq} = R_v i_{Lq} + \omega_g L_v i_{Ld} \end{cases} \quad (26)$$

式中: i_{Ld} 和 i_{Lq} 为电感电流的 d 、 q 轴分量; R_v 、 L_v 和 ω_g 分别为虚拟电阻、虚拟电感和构网型 VSG 生成的角频率。

2.2 VDCM 控制策略

为提升制氢系统直流母线的动态响应能力, 将 VDCM 的机械方程与电动势平衡方程引入到储能系统 DC/DC 变换器中^[30]。具体控制框图见图 1 VDCM 部分, 该策略包含电压外环控制、VDCM 控制及电流内环控制 3 部分。将母线电压 U_2 等效为直流发电机端电压 U_a , 输出电流 i_{out} 等效为直流发电机电枢电流 i_a , 使储能 DC/DC 变换器具备类似于直流发电机的外特性。

电动势平衡方程为:

$$E_a = U_a + i_a R_a \quad (27)$$

式中: E_a 为电枢电压, $E_a = C_T \Phi \omega$, C_T 为转矩系数, Φ 为磁通, ω 为直流发电机机械角速度; U_a 为虚拟发电机端电压, R_a 为电枢电阻。

直流发电机机械方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (28)$$

VDCM 机械功率 P_m 和电磁功率 P_e 表示为:

$$\begin{cases} P_m = T_m \omega \approx T_m \omega_0 \\ P_e = T_e \omega \approx E_a i_a \end{cases} \quad (29)$$

2.3 小信号建模分析

本节结合构网型 VSG 和 VDCM 传递函数验证控制策略的动态响应特性, 根据式(22)—(26), 构网型 VSG 小信号模型如图 6(a)。

小信号参数取值见表 1, 构网型 VSG 输入输出有功功率小信号传递函数为:

$$G(s) = \frac{P(s)}{P_m(s)} = \frac{\frac{U_g E}{J \omega_n x}}{s^2 + \left(\frac{D}{J} + \frac{K_p}{J \omega_n}\right)s + \frac{U_g E}{J \omega_n x}} \quad (30)$$

式中: $P(s)$ 为构网型 VSG 输出功率; E 为端电压; U_g 为电网电压; K_p 为下垂系数; x 为等效电抗。

根据式(30)分别绘制转动惯量 J 和阻尼系数 D 变化下输出有功功率的根轨迹如图 7, 有功功率动态响应情况见附录 B 图 B4。

结合图 7 及附录 B 图 B4 可知, 构网型 VSG 传递函数闭环极点均位于实轴左侧, 随着转动惯量 J 逐渐增加, 极点逐渐向虚轴靠近, 系统稳定裕度减小, 振荡趋势逐渐明显, 恢复稳定时间变长; 而当阻尼系数 D 逐渐增大时, 系统极点逐渐远离虚轴, 振荡趋势逐渐减弱, 恢复稳定时间也明显缩短。

结合式(27)—(29)得到 VDCM 小信号模型如图 6(b)所示, 其输入输出电压小信号传递函数为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{U_2(s)} = \frac{U_{\text{ref}} C_T \Phi R_a (k_p s + k_i)}{J R_a \omega_n s^2 + ((C_T \Phi)^2 + D R_a) s} \quad (31)$$

与图 6(b)对应, $U(s)$, $U_2(s)$, $U_{2\text{ref}}$ 分别是变换器端口输出电压、直流母线电压及直流母线电压参考值; k_p 和 k_i 分别为 PI 环节中比例环节和积分环节的参数。绘制 VDCM 输入输出电压的根轨迹如图 8

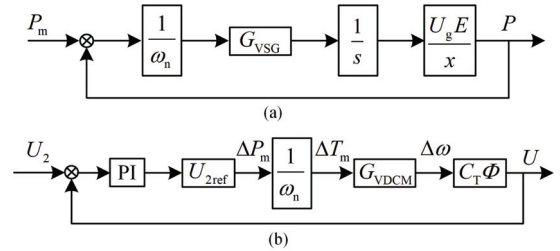


图 6 构网型 VSG 和 VDCM 小信号模型

Fig.6 Small signal model of grid-forming VSG and VDCM

表 1 小信号参数取值

Table 1 Parameters of small signal

参数	取值	参数	取值
U_g/V	690	$U_{2\text{ref}}/V$	2 000
L/H	0.001 5	$C_T \Phi$	5.1
$\omega_n /(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	314	k_p	0.01
K_p	0.08	k_i	60

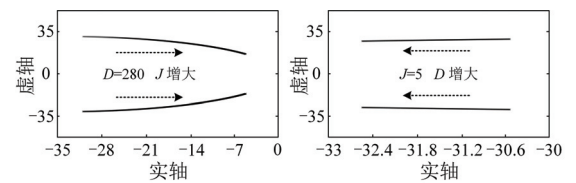


图 7 转动惯量 J 和阻尼系数 D 变化时系统根轨迹

Fig.7 Root locus of the system for variation of the inertia J and damping D

所示, 电压动态响应情况见附录 B 图 B5。

结合图 8 及附录 B 图 B5, VDCM 闭环传函极点均位于实轴左侧, 转动惯量 J 增加导致电压超调量逐渐增大, 振荡情况也愈加明显, 恢复稳定时间变长; 而当阻尼系数 D 逐渐增大时, 超调量逐渐减小, 系统极点逐渐远离虚轴, 响应速度更加缓慢。综上所述, 转动惯量 J 和阻尼系数 D 对系统动态响应的影响情况较大, 为确保控制策略的稳定性与动态性能, 需要合理选择惯量 J 和阻尼 D 的值。

3 仿真研究

为验证构网型 VSG 及 VDCM 控制策略的有效性, 本章结合 1、2 章推导的数学模型、控制策略及附录 A 相关参数, 在 MATLAB/SIMULINK 平台中搭建了 6.5 MW HD-PMSG、AEL 及构网型储能物理仿真模型, 其结构与图 1 拓扑结构相同。结合实际工程参数, 将风-氢-储系统接入弱电网中 (SCR=2.3), 分别对变风速下构网型 VSG 主动支撑、无功变化下构网型 VSG 主动支撑及 AEL 投切运行 VDCM 支撑等 3 种典型工况进行验证分析。

3.1 变风速下构网型 VSG 主动支撑仿真验证

在风-氢-储系统中, 风速的变化会直接影响 HD-PMSG 的输出功率。为验证构网型 VSG 在风速变化下对风电制氢系统功率支撑情况, 设置系统 1.5 s 时 HD-PMSG 风速由额定 12 m/s 逐渐下降至 11.6 m/s, 并在 3.5 s 时逐渐恢复额定运行, HD-PMSG 功率、电压和电流变化情况如图 9。

1.5 s 时风速降低至 11.6 m/s, HD-PMSG 输出功率也由额定 6.55 MW 降低至 6.02 MW, 其无功保持在较低水平; 风机并网电压维持 563.4 V; 并网电流逐渐降低, 由原来额定 7 770 A 降低至 7 120 A。3.5 s 后风速逐渐恢复至 12 m/s, HD-PMSG 并网功率及电流也逐渐恢复。在 1.5~3.5 s 风速降低过程中, 并网功率减少, HD-PMSG 不能提供额外功率支撑的情况下, 利用构网型储能弥补系统 500 kW 功率

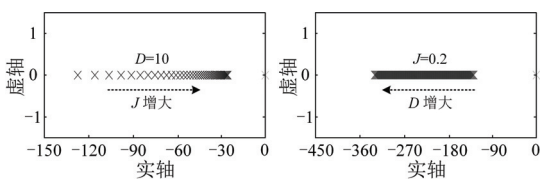


图 8 转动惯量 J 和阻尼系数 D 变化时系统根轨迹

Fig.8 Root locus of the system for variation of the inertia J and damping D

空缺, 并在短时间内快速响应。变风速下构网型储能主动支撑 PCC 点仿真结果如图 10。

根据图 10, 1.5 s 时构网型储能释放 500 kW 有功功率维持系统功率平衡, 无功功率需求为 0, 但却在储能投入过程中出现短暂的波动, 这是由于系统功率不平衡时储能系统释放功率维持系统稳定, 需要根据无功需求对无功进行调整, 从而导致小幅

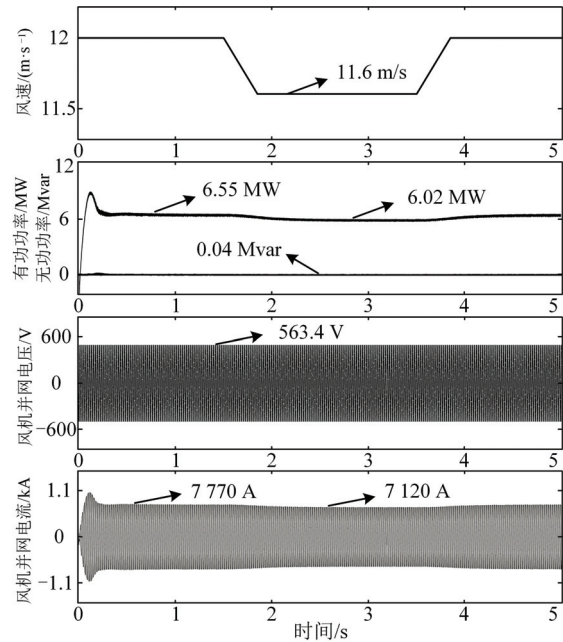


图 9 变风速下 HD-PMSG 仿真图

Fig.9 HD-PMSG simulation under variable wind speeds

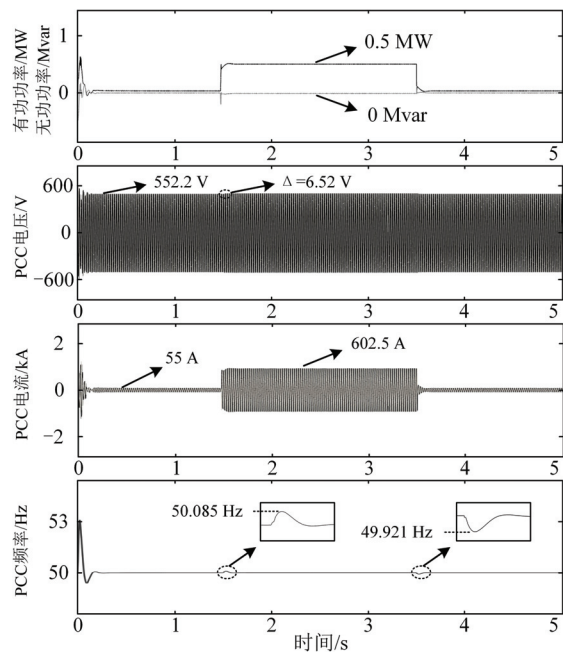


图 10 变风速下构网型储能主动支撑 PCC 点仿真

Fig.10 Simulation of grid-forming energy storage active supports PCC points under variable wind speeds

度的无功波动。储能投入过程中，PCC 点电压有小幅度的升高，其增幅 ΔU 为 6.52 V；PCC 并网电流也升高至 602.5 A，当系统有功功率在 3.5 s 时恢复正常时，储能系统停止释放功率。在储能投入运行时，系统频率出现短暂升高和减小的现象，并且很短时间内恢复正常，其幅值分别为 50.085 Hz 和 49.921 Hz，均属于正常波动范围。

3.2 无功变化下构网型 VSG 主动支撑仿真验证

在 AEL 制氢的过程中，考虑到 AEL 电解池、电极等均具有一定感性和容性，使得电流通过电解槽时无法完全与电压同步，导致电压和电流之间存在一定相位差，进一步产生不必要的无功功率。此外，AEL 中电解液温度、浓度等因素都可能导致内部电位不均衡从而产生无功功率。无功功率的存在会影响 AEL 的运行效率，严重时甚至会导致制氢系统电压波动和不稳定。因此，本节重点分析风-氢-储系统中无功功率突增时，构网型储能对系统无功功率的支撑情况。分别设置系统 1~2 s 时和 3~4 s 时系统突增 300 kvar 和 500 kvar，PCC 点功率、电压和电流的变化情况如图 11 所示。

设置构网型储能系统初始并网功率为 1 MW，1 s、3 s 时刻系统突增 300 kvar、500 kvar 无功功率，牺牲少量并网有功功率，为系统无功缺额提供补充。2 s、4 s 时系统无功缺额恢复正常，有功功率也回归稳定并网运行。构网型储能为系统提供无功功率支撑期间，PCC 点电压仅在投切时刻出现微小的电压降落和电压升高现象，并在较短的时间内恢复至 565.6 V。由此可见，在构网型储能提供无功支撑作用时，PCC 电压可稳定不变，展现出较好的电压支撑作用。

根据 PCC 处电流变化情况可知，在构网型储能系统提供无功功率支撑的两个时间段内，PCC 电流基本维持稳定。在构网型储能系统进行投切时，PCC 电流出现短暂的升高和降低现象，由于储能系统需要及时响应系统有功无功变化情况，但功率增减过程并不会立刻达到理想状态，进而导致电流出现升高和降低的变化。此外，储能提供无功支撑的数额越多，其涨幅及跌落程度越明显。

3.3 AEL 投切运行 VDCM 主动支撑仿真验证

直流母线的稳定运行关系到整个制氢系统的运行状态。当系统 AEL 投切时，直流母线需要承受较大的电流冲击，严重时甚至会出现直流母线电压波动、设备损坏等问题。本节重点围绕 AEL 投切运

行时制氢系统直流母线的稳定运行展开研究。在制氢系统直流母线处设置 0.6 s 时刻投入一台 200 Nm³/h 的 AEL 运行，结合传统双闭环控制对比验证 VDCM 控制优势，直流母线的电压、电流动态响应波形如图 12 所示。其中，图中对比了不同参数 D 、 J 条件下系统动态响应变化程度。

制氢系统 0.6 s 投入 AEL 运行后，直流母线电压出现不可避免的波动变化，传统双闭环控制能够快速响应系统变化，但却出现较大的电压跌落；相比而言，VDCM 策略对电压跌落具有明显的改善作用，改进后电压跌落幅值有 $\Delta=130$ V 的拉升。此外，通过调节阻尼系数 D 及转动惯量 J 可为直流系统提供稳定阻尼惯量支撑，在一定程度上会减缓母线电

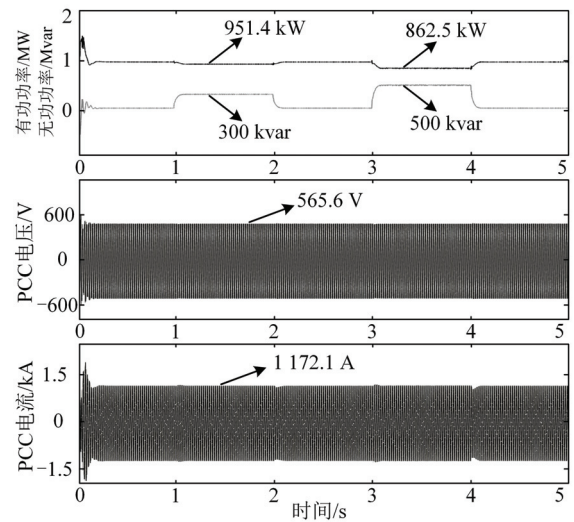


图 11 无功变化下构网型储能主动支撑 PCC 点仿真
Fig.11 Simulation of grid-forming energy storage active support PCC points under variable reactive power

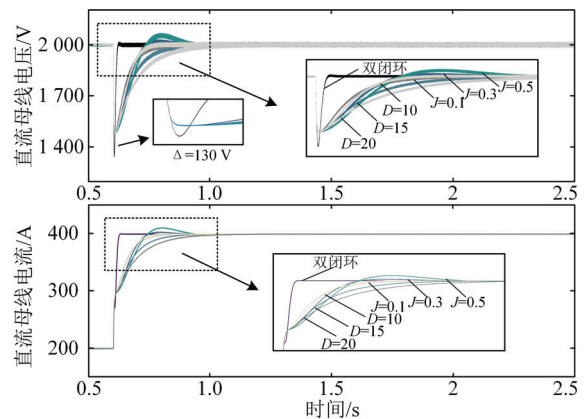


图 12 AEL 投入运行时直流母线电压、电流响应
Fig.12 DC bus voltage and current response at AEL input operation

压变化的速度, 进一步增强制氢系统的动态性能及鲁棒性。投入运行后, VDCM 控制方式的电流响应速度相对较慢, 这是由于 DC/DC 变换器模拟了直流发电机的机械惯性和阻尼特性, 从而导致电流动态特性出现滞后性的作用。在一定程度上可以有效避免母线电流出现大幅度波动情况, 改善制氢直流侧的稳定性和鲁棒性。

设置制氢系统直流母线处 2.6 s 后切除一台 200 Nm³/h 的 AEL 运行, 切除后直流母线电压、电流动态响应特性如图 13 所示。

AEL 切除运行后, 制氢系统负载突然减小, 直流母线电流也随之减小。由于输出阻抗较小, 从而产生瞬间电压升高现象, 双闭环控制方式快速响应系统电压变化同时产生较大的电压差; 而采用 VDCM 控制时, 由于惯性和阻尼作用, 切除过程中产生的电压差相差 $\Delta=170$ V, 其动态响应特性也得到了改善。阻尼系数 $D(D=10)$ 一定时, 随着转动惯量 J 的增加, 系统超调现象愈加明显, 其恢复稳定速度也就越慢; 转动惯量 $J(J=0.2)$ 一定时, 阻尼系数增大, 电压动态响应速度逐渐缓慢, 其电压波动幅值也逐渐减小, 恢复到稳态的时间也会延长, 在一定程度上提高了系统的稳定运行能力。2.6 s 后 AEL 切除运行后, VDCM 控制时母线电流下降速度更加平滑, 恢复稳定的时间相对较慢, 避免了母线电流快速降低对直流系统的影响情况, 有助于提高制氢直流系统的性能和稳定性。

4 结论

针对风-氢-储系统接入弱电网条件下电压、频率主动支撑能力弱及制氢系统惯量、阻尼缺失导致系统稳定性差等问题, 本文提出基于构网型储能的双虚拟电机控制策略有效改善风-氢-储系统稳定控制能力, 得出结论如下:

1) 当风-氢-储系统有功功率波动时, 构网型 VSG 策略能够快速响应补充系统功率缺额, 保证系统频率在正常范围内波动; 无功功率波动时, 能合理分配有功/无功功率, 并能有效保持 PCC 处电压保持恒定, 为系统提供稳定的频率、电压支撑。

2) 相较于传统控制方式, VDCM 策略能够为制氢系统的直流母线提供一定惯量、阻尼支撑, 在制氢负荷投切过程中可以有效避免直流母线电压出现大幅度波动现象, 保证制氢系统稳定运行。

随着可再生能源发电系统的大规模并网及制

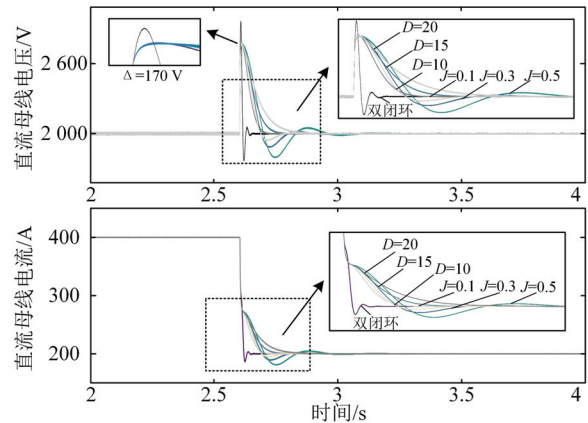


图 13 AEL 切除运行时直流母线电压、电流响应

Fig.13 DC bus voltage and current response at AEL cut-off operation

氢系统的快速发展, 风-氢-储系统势必成为未来能源互联网的重要形态之一, 关于系统协调稳定控制的研究也尤为重要。本研究有望为今后可再生能源规模化制氢及风-氢-储系统高效运行提供理论基础及参考依据。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] 彭生江, 杨淑霞, 袁铁江. 面向风煤富集区域的风-氢-煤耦合系统演化发展系统动力学[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3478-3486. PENG Shengjiang, YANG Shuxia, YUAN Tiejiang. System dynamics of the evolutionary development of coupled wind-hydrogen-coal system for wind-coal enriched areas[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3478-3486.
- [2] WU C, ZHANG X P, STERLING M. Wind power generation variations and aggregations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1): 17-38.
- [3] 王士博, 孔令国, 蔡国伟, 等. 电力系统氢储能关键应用技术现状、挑战及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6660-6680. WANG Shibo, KONG Lingguo, CAI Guowei, et al. Current status, challenges, and prospects of key application technologies for hydrogen storage in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6660-6680.
- [4] GERICKE N, THOMAS S. Certification of green hydrogen: Recent efforts and developments in the European Union[R/OL]. Deutsche Gesellschaft für international Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2022.07. https://climateandenergypartnerships.org/fileadmin/global/publications_docs/Certification_of_green_hydrogen_EN.pdf.
- [5] 氢能产业发展中长期规划(2021-2035 年)[EB/OL].[2022-03-23]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/P02022032331439-6580505.pdf>. Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035)[EB/OL]. [2022-03-23]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/P020220323314396580505.pdf>.
- [6] SHE B X, LI F X, CUI H T, et al. Fusion of microgrid control with model-free reinforcement learning: review and vision[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 3232-3245.
- [7] 曹伟, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207. CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4):

- 190-207.
- [8] LIU Y H, WANG Y, LIU X K, et al. Steady-state angle stability analysis of parallel grid-forming converters in current saturation mode[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(7): 8039-8044.
- [9] 郭小强, 魏玉鹏, 万燕鸣, 等. 新能源制氢电力电子变换器综述[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(20): 185-199.
GUO Xiaoqiang, WEI Yupeng, WAN Yanming, et al. Review on power electronic converters for producing hydrogen from renewable energy sources[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(20): 185-199.
- [10] SUN X H, CAO X Y, ZENG B, et al. Multistage dynamic planning of integrated hydrogen-electrical microgrids under multiscale uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(5): 3482-3498.
- [11] 杜易达, 王 迹, 谭忠富, 等. 电-碳-气-绿证市场耦合下的电氢耦合系统运行优化研究[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3121-3131.
DU Yida, WANG Er, TAN Zhongfu, et al. Operation optimization of electro-hydrogen coupling system under coupling of electricity, carbon, gas and green card market[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3121-3131.
- [12] 王永利, 向 皓, 郭 璐, 等. 面向多能互补的分布式光伏与电氢混合储能规划优化研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(2): 564-576.
WANG Yongli, XIANG Hao, GUO Lu, et al. Research on planning optimization of distributed photovoltaic and electro-hydrogen hybrid energy storage for multi-energy complementarity[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(2): 564-576.
- [13] 袁铁江, 谭 捷, 万 志. 考虑下游氢负荷波动的新能源制氢系统协调控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 150-157.
YUAN Tiejia, TAN Jie, WAN Zhi. Coordinated control strategy of hydrogen producing system powered by renewable energy considering downstream hydrogen load fluctuations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 150-157.
- [14] 迟永宁, 江炳蔚, 胡家兵, 等. 构网型变流器: 物理本质与特征[J]. *高电压技术*, 2024, 50(2): 590-604.
CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2): 590-604.
- [15] 孔令国, 于家敏, 蔡国伟, 等. 基于模型预测控制的离网电氢耦合系统功率调控[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(9): 3139-3148.
KONG Lingguo, YU Jiamin, CAI Guowei, et al. Power regulation of off-grid electro-hydrogen coupled system based on model predictive control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(9): 3139-3148.
- [16] 张 学, 裴 玮, 梅春晓, 等. 含电/氢复合储能系统的孤岛直流微电网模糊功率分配策略与协调控制方法[J]. *高电压技术*, 2022, 48(3): 958-968.
ZHANG Xue, PEI Wei, MEI Chunxiao, et al. Fuzzy power allocation strategy and coordinated control method of islanding DC microgrid with electricity/hydrogen hybrid energy storage systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(3): 958-968.
- [17] HUANG C J, ZONG Y, YOU S, et al. Analytical modeling and control of grid-scale alkaline electrolyzer plant for frequency support in wind-dominated electricity-hydrogen systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(1): 217-232.
- [18] 邓 浩, 陈 洁, 焦东东, 等. 风氢耦合并网系统能量管理控制策略[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 99-106.
DENG Hao, CHEN Jie, JIAO Dongdong, et al. Control strategy for energy management of hybrid grid-connected system of wind and hydrogen[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 99-106.
- [19] 袁铁江, 张江飞, 滕 越. 基于虚拟同步机的新能源制氢系统协调控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(1): 163-174.
YUAN Tiejia, ZHANG Jiangfei, TENG Yue. Coordinated control strategy of the renewable energy hydrogen production system based on VSG[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(1): 163-174.
- [20] 于艳君, 崔明恺, 柴 凤. 双绕组永磁同步电机滑模变结构控制[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(22): 5799-5807.
YU Yanjun, CUI Mingkai, CHAI Feng. Sliding mode variable structure control of a dual-winding permanent magnet synchronous motor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(22): 5799-5807.
- [21] 曾国宏, 董玉昆, 吴学智, 等. 双绕组永磁同步电机的模块化对等控制[J]. *航空学报*, 2022, 43(8): 325488.
ZENG Guohong, DONG Yukun, WU Xuezhi, et al. Modular peer-to-peer control of dual-winding permanent magnet synchronous motor[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(8): 325488.
- [22] SHEN Y, PENG Y L, SHUAI Z K, et al. Hierarchical time-series assessment and control for transient stability enhancement in islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(5): 3362-3374.
- [23] SÁNCHEZ M, AMORES E, ABAD D, et al. Aspen Plus model of an alkaline electrolysis system for hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(7): 3916-3929.
- [24] ABOUKALAM DA CRUZ M H A, ETANCELIN M, MARIAS F, et al. Dynamic modelling of an alkaline water electrolysis system and optimization of its operating parameters for hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(35): 12982-12999.
- [25] JANG D, CHO H S, KANG S. Numerical modeling and analysis of the effect of pressure on the performance of an alkaline water electrolysis system[J]. *Applied Energy*, 2021, 287: 116554.
- [26] HAVERKORT J W, RAJAEI H. Voltage losses in zero-gap alkaline water electrolysis[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 497: 229864.
- [27] HUANG D J, ZHONG Z Y, AI X M, et al. Size design strategy for scaling up alkaline water electrolysis stack integrated with renewable energy source: a multiphysics modeling approach[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 300: 117955.
- [28] 王金鑫, 任永峰, 孟庆天, 等. 自抗扰控制的九开关变流器提升分散式风电系统电能质量[J]. *高电压技术*, 2023, 49(12): 5207-5216.
WANG Jinxin, REN Yongfeng, MENG Qingtian, et al. Nine-switch converter with active disturbance rejection control to improve power quality of distributed wind power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(12): 5207-5216.
- [29] 薛翼程, 张哲任, 徐 政, 等. 构网型变流器对交流系统低频振荡的影响分析与阻尼控制[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(16): 103-113.
XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng, et al. Impact analysis and damping control of grid-forming converter for low-frequency oscillation of AC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(16): 103-113.
- [30] 王 勉, 唐 芬, 陈麒宇, 等. DC-DC 变换器并联系统无源控制及大信号稳定性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6789-6802.
WANG Mian, TANG Fen, CHEN Qiyu, et al. Passivity-based control and large signal stability of DC-DC converter parallel system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18): 6789-6802.



HE Bin

Ph.D. candidate



REN Yongfeng

Ph.D., Professor

Corresponding author

贺 彬

1994—, 男, 博士生

主要研究方向: 可再生能源发电运行控制、氢能及储能控制技术方面的研究

E-mail: batefulai558@126.com

任永峰(通信作者)

1971—, 男, 博士, 教授, 博导

主要研究方向: 新型电力系统运行与控制、新能源发电、氢能与储能技术方面的研究

E-mail: renyongfeng@vip.sina.com

附录 A

1、六相静止坐标系下 HD-PMSG 各参数具体形式

六相静止坐标系下 HD-PMSG 定子绕组各参数具体形式：

$$\mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\Psi}_s = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}_s(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - \pi/6) \\ \cos(\theta - 5\pi/6) \\ \cos(\theta - 3\pi/2) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{L}_s = L_{ls} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\pi/3) & \cos(4\pi/3) & \cos(\pi/6) & \cos(5\pi/6) & \cos(\pi/2) \\ \cos(2\pi/3) & 1 & \cos(2\pi/3) & \cos(\pi/2) & \cos(\pi/6) & \cos(5\pi/6) \\ \cos(4\pi/3) & \cos(2\pi/3) & 1 & \cos(5\pi/6) & \cos(\pi/2) & \cos(\pi/6) \\ \cos(\pi/6) & \cos(\pi/2) & \cos(5\pi/6) & 1 & \cos(2\pi/3) & \cos(4\pi/3) \\ \cos(5\pi/6) & \cos(\pi/6) & \cos(\pi/2) & \cos(2\pi/3) & 1 & \cos(2\pi/3) \\ \cos(\pi/2) & \cos(5\pi/6) & \cos(\pi/6) & \cos(4\pi/3) & \cos(2\pi/3) & 1 \end{bmatrix}。$$

其中 L_{ls} 、 L_m 分别为定子绕组漏感和互感(H)。

2、仿真参数

表 A1 半直驱风机参数

Table A1 Parameters of HD-PMSG

参数	值	参数	值
额定容量 S_n/MVA	6.5	滤波电感 L/mH	0.45
额定电压 U_n/V	690	滤波电阻 R/Ω	0.002
额定频率 f/Hz	50	直流侧电压 U_{dc}/V	1 600

表 A2 构网型 VSG 参数

Table A2 Parameters of grid-forming VSG

参数	值	参数	值
惯量系数 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	20	直流侧电压 U_{dc}/V	1 200
阻尼系数 $D/(\text{N}\cdot\text{m})$	280	滤波电感 L_3/mH	0.45
有功下垂系数 K_p	0.05	滤波电阻 R_3/Ω	0.002
无功下垂系数 K_q	800	滤波电容 $C_3/\mu\text{F}$	500

表 A3 碱性电解槽参数

Table A3 Parameters of alkaline electrolytic

参数	值	参数	值
温度 T/K	348.15	阳极电荷转移系数 α_a	0.6
气体常数 $R/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$	8.314	阴极电荷转移系数 α_c	0.77
电解液浓度 w	30%	电极面积 A/cm^2	34.96
法拉第常数 $F/(\text{C}\cdot\text{mol}^{-1})$	96 485	隔膜面积 S_m/cm^2	50
阳极有效电阻率 $\rho_a/(\Omega\text{m}^2)$	9.78×10^{-8}	氢氧根离子传递长度 l/mm	4.6
阴极有效电阻率 $\rho_c/(\Omega\text{m}^2)$	6.84×10^{-8}	阳极 L_a /阴极 L_c 厚度/m	2×10^{-3}
浓差过电压常数 β	0.04	扩散极限电流 $i_{lim}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	20 000

附录 B

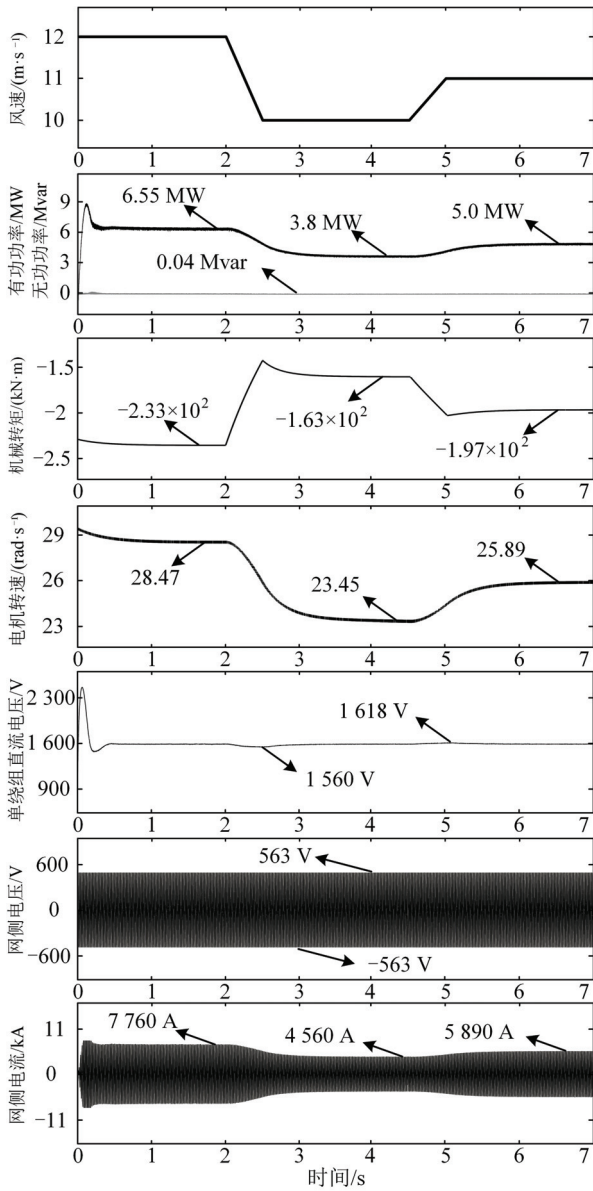


图 B1 多风速下 HD-PMSG 仿真运行结果

Fig.B1 HD-PMSG simulation results under multiple wind speeds

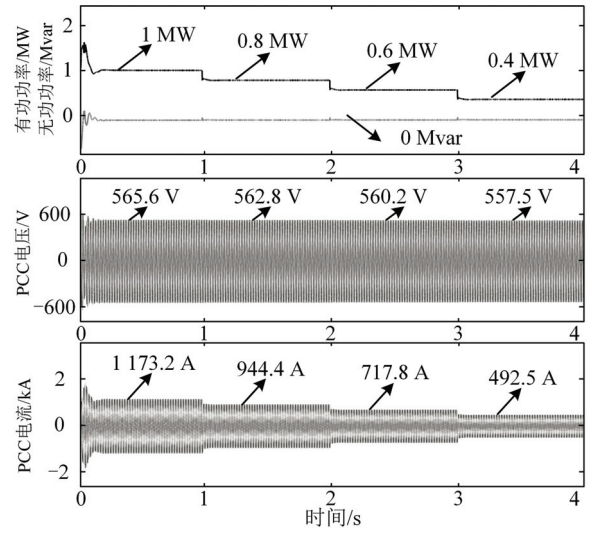


图 B2 构网型储能放电测试仿真运行结果

Fig.B2 Simulation operation results of grid-forming energy storage discharge test

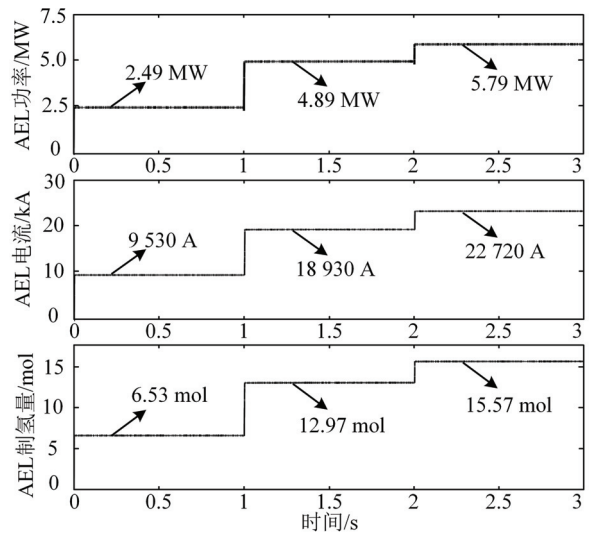


图 B3 AEL 仿真运行结果

Fig.B3 AEL simulation running results

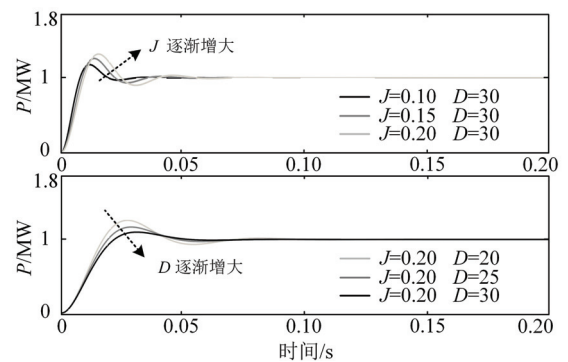


图 B4 不同 J 、 D 下有功功率动态响应(VSG)

Fig.B4 Dynamic response of active power (VSG) under different J and D conditions

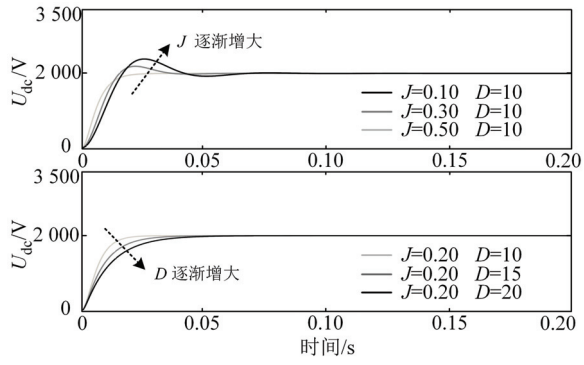


图 B5 不同 J 、 D 下母线电压动态响应(VDCM)

Fig.B5 Dynamic response of bus voltages (VDCM) under different J and D conditions