

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403042

# 考虑储氢压强的风氢耦合系统构网型 自适应控制策略

张维昊, 任永峰, 贺彬, 照日格图, 方琛智, 陈建  
(内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**[摘要]** 针对风氢耦合系统接入弱电网下负荷变动导致系统频率波动及越限问题, 提出基于储氢系统压强动态反馈的构网型虚拟同步发电机 (virtual synchronous generator, VSG) 转动惯量自适应控制策略。首先建立了构网型风氢耦合系统物理仿真模型, 推导有功功率闭环传递函数, 分析了转动惯量和阻尼系数对系统功频振荡特性的影响情况; 然后考虑储氢系统压强的动态变化实时优化转动惯量的计算, 保证风氢耦合系统在电网频率波动及负荷有功波动下稳定运行; 最后通过 MATLAB/SIMULINK 进行策略验证。研究结果表明: 采用构网型自适应方法可加快系统频率恢复, 大幅度提升系统的动态响应能力, 实现风氢耦合系统稳定运行。

**[关键词]** 风氢耦合系统; 构网型虚拟同步发电机; 自适应控制; 转动惯量

**[引用本文格式]** 张维昊, 任永峰, 贺彬, 等. 考虑储氢压强的风氢耦合系统构网型自适应控制策略[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 68-76. ZHANG Weihao, REN Yongfeng, HE Bin, et al. Self-adaptive control strategy of wind-hydrogen coupling system considering hydrogen storage pressure[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 68-76.

## Self-adaptive control strategy of wind-hydrogen coupling system considering hydrogen storage pressure

ZHANG Weihao, REN Yongfeng, HE Bin, Zhaorigetu, FANG Chenzhi, CHEN Jian  
(College of Energy and Power Engineering Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** To address the frequency fluctuations and exceeding limits caused by load changes when wind hydrogen coupling system is connected to the weak current grid, a grid type virtual synchronous generator (VSG) moment of inertia self-adaptive control strategy based on dynamic feedback of hydrogen storage system pressure is proposed. Firstly, a physical simulation model of the grid type wind hydrogen coupling system is established, the closed-loop transfer function of active power is derived, and the influence of rotational inertia and damping coefficient on the power frequency oscillation characteristics of the system is analyzed. Then, considering the dynamic changes in pressure of the hydrogen storage system, the moment of inertia calculation is optimized in real time to ensure stable operation of the wind hydrogen coupling system under grid frequency fluctuations and load active power fluctuations. Finally, the strategy is validated using MATLAB/SIMULINK platform. The results show that, using the grid type self-adaptive method can accelerate the frequency recovery of the system, significantly improve the dynamic response ability of the system, and achieve stable operation of the wind hydrogen coupling system.

**Key words:** wind-hydrogen coupling system; grid-forming VSG; self-adaptive control; moment of inertia

收稿日期: 2024-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (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); 自治区直属高校基本科研业务费项目 (JY20220094, JY20230066, ZTY2023034)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52367022, 51967016); Key Research and Development and Achievement Transformation Project of Inner Mongolia Autonomous Region (2023YFHH0077); Inner Mongolia Autonomous Region Science and Technology Innovation Major Demonstration Project “Unveiling the Leader” Project (2023JBGS0013); Fundamental Scientific Research Funds for Colleges and Universities Directly Under the Autonomous Region (JY20220094, JY20230066, ZTY2023034)

第一作者简介: 张维昊 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为可再生能源发电并网运行与控制, zzh1723444989@163.com.

通信作者简介: 贺彬 (1994), 男, 博士研究生, 主要研究方向为可再生能源发电及并网, batefulai558@126.com.

中国“碳达峰、碳中和”目标的提出,是着力解决资源约束与环境恶化问题的必然选择。以太阳能、风能为主的可再生能源发电进入大踏步的发展进程,风电、太阳能发电比例与装机容量达到历史新高。以风能为主的新能源发电越来越受到研究学者们的重视,但其波动性与随机性,使得不得不弃风限电。同时随着新能源发电系统大量接入电网,电力系统中的电力电子器件占比增高,这些电力电子设备几乎没有惯量和阻尼,也不参与电网的调频调压,这使得电网的稳定性与可控性变得更加复杂和严苛<sup>[1-2]</sup>。

储能作为促进可再生能源大规模并网的技术手段,越来越被研究者重视,其中氢能源以其利用率高、无毒、高热值等优点逐渐走进研究者的视线。越来越多的国家将氢作为储能介质与新能源发电系统结合,利用氢储能系统解决风力发电的弃风消纳与电网的削峰填谷问题。

直驱式永磁同步风力发电机通过变流器实现功率最大跟踪控制。在此控制方式下,风机转速与系统频率完全解耦。当系统受到扰动时,风电机组无法响应系统频率的变化,无法为系统提供惯性支持和抑制系统功率振荡<sup>[3-4]</sup>。针对此类问题,国内外学者进行了深入研究,虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)被提出,VSG技术是在传统下垂控制的基础上引入同步发电机(synchronous generator, SG)摇摆方程,使并网逆变器能够模拟SG暂态特性,参与系统调频、调压,提供惯性支撑<sup>[5-6]</sup>。

当系统出现功率不平衡时,VSG可利用虚拟惯量和阻尼减小自身频率波动,进一步提升系统稳定运行能力<sup>[7-9]</sup>,王光宇等<sup>[10]</sup>针对电压环的影响,提出利用电压环相位补偿的方法,提升系统低频振荡的稳定性,杨效等<sup>[11]</sup>在VSG的虚拟惯量自适应公式中引入双曲线函数,阻尼控制环节中引入暂态和稳态阻尼切换的控制环节,对VSG的虚拟惯性、阻尼参数进行自适应控制,优化了逆变器输出频率和功率的动态响应曲线。张祥宇、王继磊、张巍等<sup>[12-14]</sup>通过模型对功角失稳机理与暂态特性进行了分析,改进了转动惯量的自适应公式。程国栋等<sup>[15]</sup>针对虚拟同步发电机参数自适应公式,加入了模糊控制算法,调节虚拟同步发电机参数,简化了控制策略。陈建等<sup>[16]</sup>从功频特性与功角机理2个方面对构网型VSG控制策略进行了详细分析,并且加入了UDE控

制理论,使得系统动态响应性能有明显提升。张福东等<sup>[17]</sup>利用转动惯量自适应来抑制有功功率的振荡,取得较好抑制效果,但是该控制模式下系统的鲁棒性欠佳。

储能系统的加入,为VSG的调节过程提供能量缓冲。杨帆等<sup>[18]</sup>建立了考虑储能荷电状态(state of charge, SOC)约束的VSG控制模型,从储能容量及SOC数值上对虚拟惯性的取值进行了限制,但是没有考虑储能SOC的变化对虚拟惯性取值的影响。Wang等人<sup>[19]</sup>利用蓄电池与超级电容平抑功率波动,在考虑经济性相关系数的基础上对阈值频率进行调整,但是储能没有与VSG参数控制结合。李怡等<sup>[20]</sup>基于光伏及混合储能系统,提出一种控制策略,对混合储能系统进行功率分配,并将储能SOC引入虚拟惯性自适应公式,优化系统的同时,控制储能SOC。孟建辉等<sup>[21]</sup>提出一种考虑储能充放电极限的虚拟惯性控制策略,避免了储能过充过放情况的出现,但没有综合考虑频率和储能SOC的变化,导致逆变器输出频率和功率的动态响应特性不理想。于晶荣等<sup>[22]</sup>挖掘了储能系统对惯性的作用,并提出了在给定储能系统中等效惯量的计算方法。部分文献采用传统跟网型VSG控制,依赖锁相环实现与交流电网的同步,并需要电网强度足够大才能稳定运行。风能资源多分布于西北、东北等偏远地区,因此集中发电,远距离输电需要架设远距离输电线路,致使大量线路阻抗引入电网,导致电网的频率稳定性降低,而构网型VSG通过功率控制实现与交流电网的同步,及时响应弱电网频率扰动,对弱电网支撑能力强,且并网、离网均可运行。

本文根据构网型VSG模型及其控制原理,在现有虚拟惯性自适应控制环节中引入储氢系统压强反馈系数,通过转动惯量和阻尼的自适应调节来削弱系统的超调与振荡,改善风氢耦合系统输出频率和功率的动态响应能力。其中,制氢、储氢系统装置的增设是为了消纳多余风功率和补足用电高峰期负荷的缺额功率,其与储能系统的作用相同,若再额外增加储能设备,将整个风氢耦合系统复杂化,不仅要考虑因此带来的增加系统建设成本的问题,还需考虑二者对多余功率消纳优先级的设定与在补足缺额功率时出力大小及优先级的的问题。最后,通过仿真实验验证了所提策略的可行性和有效性。

## 1 风氢耦合系统与虚拟同步机控制原理

### 1.1 构网型风氢耦合系统主拓扑结构

构网型风氢耦合系统由机侧变流器、网侧变流器、碱式电解槽、质子交换膜燃料电池、储氢罐等组成，主拓扑及控制结构如图 1 所示。

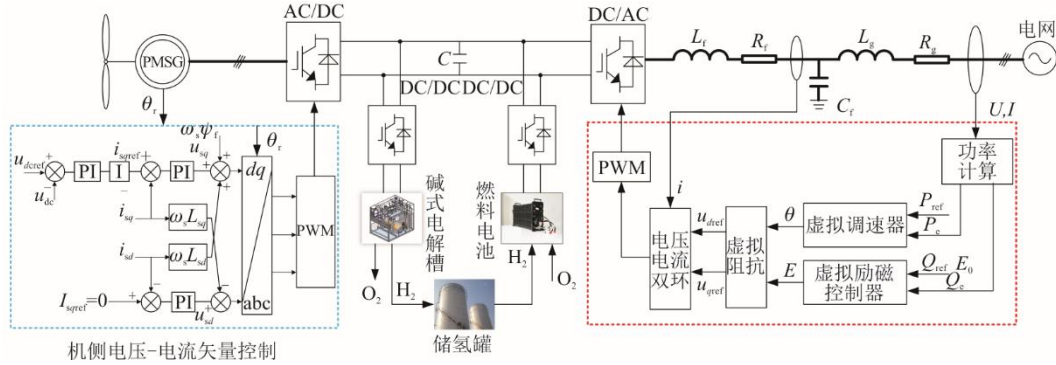


图 1 构网型风氢耦合系统拓扑及控制结构

Fig.1 Topology and control structure of the grid-based wind-hydrogen coupling system

### 1.2 VSG 控制技术原理

VSG 控制技术根据同步发电机的机械方程和电磁方程，作用在并网逆变器上，使得逆变器模拟出同步发电机转子所具备的惯量和阻尼。本文采用同步发电机的经典二阶模型建立数学模型。

VSG 控制技术在有功环节采用同步发电机的转子运动状态方程，VSG 通过有功环控制输出有功功率，参与系统一次调频。其转子机械方程为：

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_{\text{ref}} - T_e - D(\omega - \omega_n) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_n \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_{\text{ref}} = P_{\text{ref}} / \omega \\ T_e = P_e / \omega \end{cases} \quad (2)$$

式中： $J$ 、 $D$  为转动惯量和阻尼系数； $T_{\text{ref}}$  为 VSG 机械转矩； $T_e$  为电磁转矩； $\omega$  为转子角频率； $\theta$  为虚拟转子的功角； $\omega_n$  为电网额定角频率； $P_{\text{ref}}$ 、 $P_e$  分别为 VSG 有功参考功率和电磁功率。

VSG 控制技术对无功功率控制及模拟发电机励磁调压功能的实现采用式(3)：

$$K \frac{dE}{dt} = Q_{\text{ref}} - Q_e + K_q (U_n - U_0) \quad (3)$$

式中： $Q_{\text{ref}}$  为无功功率设定值； $U_n$  为 VSG 端电压的额定峰值； $U_0$  为 VSG 端电压实际峰值； $E$  为逆变器桥臂中点电势峰值。

构网型 VSG 控制模型结构如图 2 所示。通过有功环生成电压相位  $\theta$ ，无功环生成电压幅值  $E$ ，

组成，主拓扑及控制结构如图 1 所示。机侧变流器则采用电压-电流双闭环的传统矢量控制策略；网侧变流器采用构网型 VSG 控制策略；碱式电解槽与质子交换膜燃料电池耦合于直流母线。

并将生成的电压幅值作为电压环给定值进行控制。

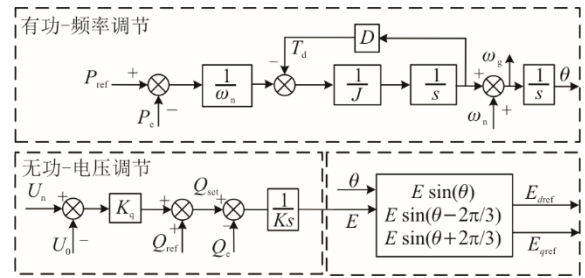


图 2 构网型 VSG 功率环控制

Fig.2 Control logic of the grid-forming VSG power ring

## 2 稳定性分析及参数选取

### 2.1 VSG 功角稳定机理

传统大型同步发电机内部转子储存着大量动能，电网在受到扰动时，内部转子通过释放储存的动能来维持电网稳定，根据式(1)可推导出式(4)：

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e - D(\omega - \omega_n)}{J} \quad (4)$$

由式(4)可知，角速度的变化率与惯量成反比。当惯量数值较小时，角速度变化率将增大，导致系统的稳定性降低；当惯性数值较大时，转子角速度变化率较小，系统稳定性高，但同时也会导致系统动态调节能力下降。

当 VSG 的有功参考指令出现扰动时，系统的功率和频率都会出现衰减震荡，具体如图 3 所示。点 A 为  $P_1$  功率对应的稳态点，当参考功率由  $P_1$

突变到  $P_2$  时, 由于惯性的作用, 功率由点  $A$  移动到点  $B$ , 再到最大值点  $C$ , 然后从点  $C$  往点

$A$  移动, 如此反复, 振荡衰减, 最后稳定在点  $B$ 。频率也是如此, 将振荡过程分为① $t_1-t_2$ 、② $t_2-t_3$ 、③ $t_3-t_4$ 、④ $t_4-t_5$  4 个区间。当参考功率由  $P_1$  增加到  $P_2$  时, 导致 VSG 转子角速度加快。区间①内, 转子角速度大于电网角速度, 利用较大的转动惯量来抑制转子角速度的增大; 区间②内, 转子角速度仍然大于电网角速度, 但转子角速度逐渐降低, 此时采用较小的转子惯量, 使转子角速度的加速减缓; 同理, 在区间③和区间④内转动惯量也应选取合适的数值来促进转子角速度的恢复。综上可知, 转动惯量的取值是由转子角速度变化率与转子角速度和电网角速度之差共同决定的。转动惯量选取原则见表 1。

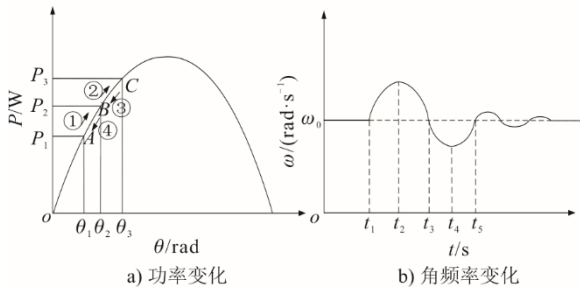


图 3 功角和频率振荡曲线

Fig.3 The power angle and frequency oscillation curves

表 1 虚拟惯性选取原则

Tab.1 Selection principle of virtual inertial

区间	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	$\Delta\omega(d\omega/dt)$	$J$
①	$>0$	$>0$	$>0$	增加
②	$>0$	$<0$	$<0$	减少
③	$<0$	$<0$	$>0$	增加
④	$<0$	$>0$	$<0$	减少

### 2.2 VSG 功频振荡分析

根据图 2 可以推导出有功功率闭环传递函数传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{P_e}{P_{ref}} = \frac{\frac{1}{J\omega_0} S_E}{s^2 + \left(\frac{D}{J} + \frac{K_\omega}{J\omega_0}\right)s + \frac{S_E}{J\omega_0}} \quad (5)$$

式中:  $S_E=UE/Z$ ;  $E$  为逆变器输出电压有效值;  $U$  为电网电压有效值;  $Z$  为等效阻抗有效值;  $K_\omega$  为调差系数。

根据式(5)得到对应的二阶模型的自然振荡角频率  $\omega_n$  和阻尼系数  $\xi$  为:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{EU}{J\omega_0 Z}} \\ \xi = D\sqrt{\frac{\omega_0 Z}{4JEU}} + K_\omega\sqrt{\frac{Z}{4J\omega_0 EU}} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(1)和图 2 绘制有功功率闭环传递函数的根轨迹如图 4 所示。当阻尼固定, 随着惯量的增大, 有功功率闭环极点逐渐靠近虚轴, 系统稳定裕度较小, 振荡加剧; 而随着阻尼系数  $D$  的增大, 闭环极点逐渐远离虚轴, 振荡减弱。

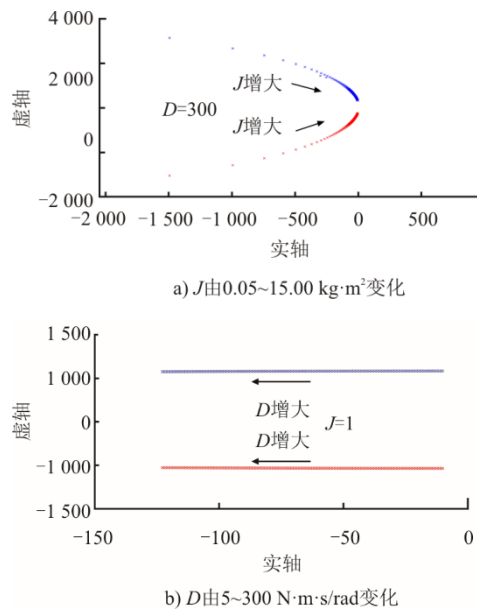


图 4 参数变化下的根轨迹

Fig.4 The root trajectory when the parameters change

图 5 为 VSG 小信号模型示意。模型根据小信号模型图进行仿真模型搭建, 并对不同转动惯量与阻尼系数下的 VSG 有功输出进行仿真对比。

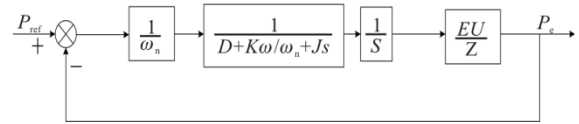


图 5 虚拟同步发电机的小信号模型  
Fig.5 Small signal model of the VSG

不同参数条件下有功功率动态响应特性如图 6 所示。根据图 6 所示: 调差系数恒定, 当  $D$  不变时  $J$  越大, 超调量增加, 调节时间增加; 当  $J$  恒定时,  $D$  越大超调量越小, 调节时间越短。分析得出, 转动惯量  $J$  和阻尼系数  $D$  对系统功频振荡都具有较大影响。系统额定容量设置为 2 MW、 $D \in [5, 60]$ 、 $J \in [0.05, 15.00]$ 。

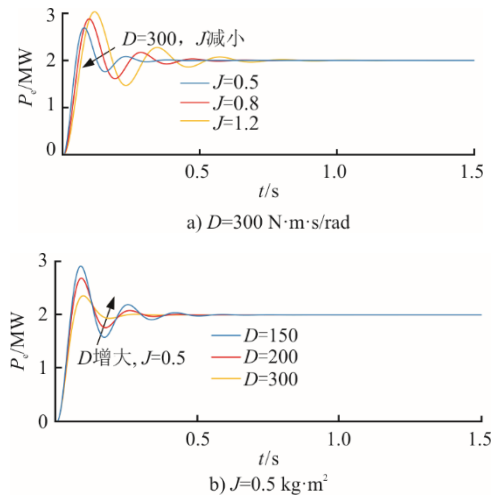


图 6 不同参数条件下有功功率动态响应特性

Fig.6 Dynamic response characteristics of active power with different parameters

### 3 考虑储氢系统压强的 VSG 虚拟惯性自适应控制

#### 3.1 能量管理策略

风氢耦合系统较为复杂，其中包含多个子系统，而子系统的启停控制尤为重要。本文针对系统中的能量流动，建立能量管理策略，以设备额定功率、储氢罐压强上下限为约束条件，结合有功参考功率切换不同工作模式，进而调整子系统工作的启停，其控制流程如图 7 所示。图 7 中： $P_{hs}$  为储氢系统消纳功率； $P_{wind}$  为风机输出功率； $P_{ref}$  为有功参考功率； $p_{tank}$  为储氢罐内压强； $p_{tankmax}$ 、 $p_{tankmin}$  分别为储氢罐预设压强上限值、下限值； $P_{elN}$ 、 $P_{fcN}$  分别为电解槽、燃料电池的额定功率； $P_{elref}$ 、 $P_{fc ref}$  分别为电解槽、燃料电池的参考功率。

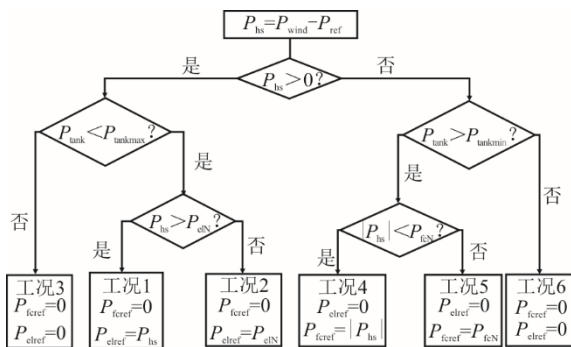


图 7 能量管理策略流程

Fig.7 Flow chart of energy management strategy

工况 1 储氢罐压强未达到上限，储氢系统消纳功率小于电解槽功率，电解槽投入工作，燃料电池不工作。

工况 2 储氢罐压强未达到上限，但储氢系统消纳功率大于电解槽功率，电解槽以额定功率投入工作，燃料电池不工作。

工况 3 储氢罐压强达到上限，出于对安全的考虑，丢弃部分储氢系统消纳功率，电解槽、燃料电池均不工作。

工况 4 储氢罐压强未达到下限，储氢系统消纳功率为负，且绝对值小于燃料电池额定功率，此时需要燃料电池工作，补足缺额功率，电解槽不工作。

工况 5 储氢罐压强未达到下限，储氢系统消纳功率为负，且绝对值等于燃料电池额定功率，燃料电池以额定功率工作，补充缺额功率，电解槽不工作。

工况 6 储氢罐压强达到下限，出于对安全的考虑，放弃对该部分缺额功率的补充，电解槽、燃料电池均不工作。

#### 3.2 改进型自适应控制原理

SOC 是用于反映储能单元剩余容量的物理量，储能电池的 SOC 为当前储能电池中可以释放的容量占可用容量的百分比。本文将制氢、储氢系统（包括碱式电解槽、燃料电池、储氢罐）与储能电池类比，相较于储能电池的充电状态，制氢、储氢系统的充电状态为电解槽电解水制氢的过程，而相比于储能电池的放电状态，制氢、储氢系统为质子交换膜燃料电池消耗氢气放电，制氢、储氢系统将所储存的电以氢气的形式存在，将储氢罐中储存的氢气所产生的压强所占储氢罐容量压强的百分比，等同于储能电池所含剩余电量，即储能电池的 SOC 状态。

本文侧重于储氢罐压强的动态变化与转动惯量自适应取值之间的关系，假设氢气泵、阀、压缩机等辅助性动力设备中无泄漏。

储氢罐在  $\Delta t$  时间段内累计储存的氢气量为：

$$n_{sto}(t_0 + \Delta t) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} (n_{inH_2} - n_{outH_2}) dt + n_{sto}(t_0) \quad (7)$$

式中： $n_{sto}(t_0)$  为  $t_0$  时刻储氢罐的储氢量； $n_{inH_2}$  为电解槽产生的氢气； $n_{outH_2}$  为质子交换膜燃料电池消耗的氢气。

储氢罐压力为：

$$P_{1sto} - P_{0sto} = \frac{RT_{sto}}{V_{sto}} n_{stoH_2} \quad (8)$$

式中： $n_{stoH_2}$  为氢气累计量； $T_{sto}$  为储氢罐温度； $V_{sto}$

为储氢罐体积； $p_{0sto}$  为储氢罐初始压强； $p_{1sto}$  为实际压强； $R$  为通用气体常数。

储能系统的荷电状态计算方法为安时积分法，其公式如下：

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int_0^{t_0} i(t) dt}{Q_0} \quad (9)$$

式中： $i(t)$  为电流； $Q_0$  为储能额定容量。

据此，本文所提出的压强余量的计算公式为：

$$p_{soc,now} = p_{soc,past} - \frac{P_{dep}}{P_{max}} \quad (10)$$

$$P_{dep} = \frac{nRT}{V} \quad (11)$$

式中： $p_{soc,now}$  为当前压强余量； $p_{soc,past}$  为上一阶段压强余量； $p_{dep}$  为消耗的氢气所占压强； $R$  为摩尔气体常数； $T$  为温度； $V$  为消耗的气体体积。

根据功角稳定机理可知，当有功指令阶跃上升时，应当增大  $J$  来减缓  $d\omega/dt$  和  $\omega$  的上升，考虑压强反馈系数  $p_{soc}$  的自适应控制，使得  $J$  得到提升。

根据上述分析，VSG 的虚拟惯性自适应控制策略如下：

$$J = \begin{cases} J_0 + K_j p_{soc} \ln\left(1 + \left|\frac{d\omega}{dt}\right|\right), & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} > 0 \cap \left|\frac{d\omega}{dt}\right| \geq T_j \\ J_0, & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} > 0 \cap \left|\frac{d\omega}{dt}\right| < T_j \\ J_0 - K_j p_{soc} \ln\left(1 + \left|\frac{d\omega}{dt}\right|\right), & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} < 0 \cap \left|\frac{d\omega}{dt}\right| \leq T_j \\ J_0, & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} < 0 \cap \left|\frac{d\omega}{dt}\right| > T_j \end{cases} \quad (12)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & |\Delta\omega| \leq T_d \\ D_0 + K_d \ln(1 + \Delta\omega) & |\Delta\omega| > T_d \end{cases} \quad (13)$$

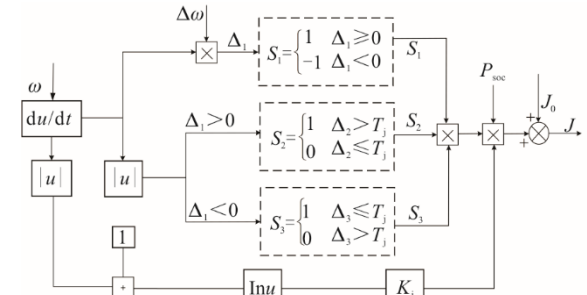
式中： $J_0$ 、 $D_0$  分别为 VSG 稳定运行时的转动惯量与阻尼系数； $K_j$ 、 $K_d$  为转动惯量调节系数； $T_j$ 、 $T_d$  为变化阈值。图 8 为转动惯量与阻尼系数的自适应控制原理。

$T_j$  取值的确定，通过对转子运动方程改写可得：

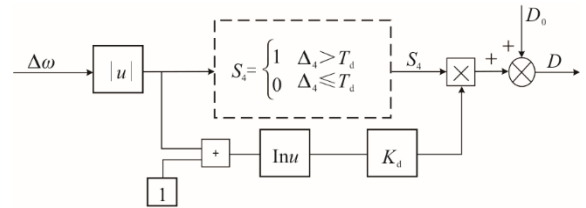
$$\left|\frac{d\omega}{dt}\right| = \left|\frac{1}{J} \left( \frac{P_{ref} - P_e}{\omega} - 2\pi D \Delta\omega \right)\right| \quad (14)$$

由本文所提转动惯量自适应控制公式与上式可得：

$$0 \leq T_j \leq \left|\frac{1}{J} \left( \frac{P_{ref} - P_e}{\omega} - 2\pi D \Delta\omega \right)\right| \quad (15)$$



a) 转动惯量自适应控制原理



b) 阻尼系数自适应控制原理

图 8 转动惯量与阻尼系数的自适应控制原理  
Fig.8 The self-adaptive control principle of moment of inertia and damping coefficient

$T_d$  的取值分析与  $T_j$  相同。由本文所提转动惯量自适应控制公式、阻尼系数自适应控制公式与对数函数特性可得阈值  $T_j$ 、 $T_d$  变化取值的分析曲线，具体如图 9 所示。

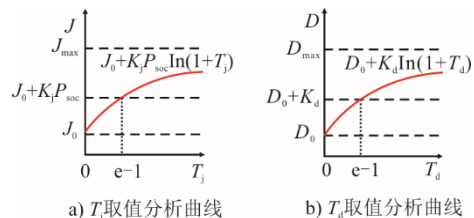


图 9 变化阈值取值分析

Fig.9 Analysis of changing threshold value

### 3.3 参数选取

由图 4 可以看出， $D$  为定值时， $J$  越大，开环极点越接近坐标原点，系统稳定性变差。因此转动惯量的选取不能过大，参考国外学者提出的 VSG 方案，为了充分利用逆变器输出功率的能力，虚拟转动惯量  $J$  的取值应该满足以下条件<sup>[23-25]</sup>：

$$J \leq \frac{P_{max}}{\max\{\omega(d\omega/dt)\}} \quad (16)$$

式中： $P_{max}$  为逆变器的功率上限。

由图 4 可以看出， $J$  为定值时， $D$  越大，极点实部的绝对值越大，系统稳定性越好，因此选取  $D > 0$  即可满足系统要求。实际工程中一般利用“最优二阶系统”的概念对  $D$  进行整定，即阻尼参数  $D$

可选为:

$$D = \frac{\sqrt{2J\omega_0 K_p - K_\omega}}{\omega_0} \quad (17)$$

调差系数  $K_\omega$  需满足:

$$K_\omega \leq \frac{P_{\max}}{\Delta\omega_{\max}} \quad (18)$$

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 仿真工况设置

验证上述控制策略的有效性, 基于 MATLAB/SIMULINK 软件搭建单台额定功率为 2 MW 的基于 VSG 的风氢耦合系统仿真模型, 参数见表 2。转动惯量  $J=1$ , 阻尼系数  $D=300$ , 风机功率 1.8 MW, 仿真时间设置为 4 s。分别设置输入有功指令阶跃扰动与电网频率扰动, 具体操作为:

1) 逆变器并网后, 有功功率指令初始值为 1.75 MW, 3 s 时阶跃至 1.85 MW, 3.5 s 时恢复至 1.75 MW, 无功功率指令设置为 0。

2) 逆变器并网后, 3 s 时设置电网频率阶跃至 50.2 Hz, 在 0.5 s 后回复正常, 无功指令设置为 0。

表 2 系统主要仿真参数

Tab.2 Main simulation parameters of the system

项目	数值	项目	数值
额定容量 $P/\text{VA}$	$2 \times 10^6$	电网频率 $f/\text{Hz}$	50
电网电压 $U_g/\text{V}$	690	滤波电感 $L_f/\text{mH}$	0.225
直流侧电压 $U_{dc}/\text{V}$	1 200	滤波电容 $C_f/\mu\text{f}$	15
惯量调节系数 $K_j$	0.05	阻尼调节系数 $K_d$	10
转动惯量 $J_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1	阻尼系数 $D_0/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	300
电解槽温度 $T_{el}/^\circ\text{C}$	60	电极面积 $A_{cell}/\text{m}^2$	0.75
单电池串联个数 $N_{el}$	300	最大电流密度 $J_{\max}/(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$	1.5
电池工作温度 $T_{ic}/^\circ\text{C}$	65	通用气体常数 $R$	8.314
储氢罐温度 $T_f/^\circ\text{C}$	25	储氢罐体积 $V_b/\text{L}$	10

### 4.2 仿真工况对比

有功指令扰动下频率与功率响应如图 10 所示。由图 10a)可以看出, 在系统有功功率指令扰动时, 采用本文所提方法与传统控制方法相比频率波动的超调量明显减少, 恢复速度加快, 暂态调整过程缩短, 振荡幅度减弱, 系统动态性能得到提升。

由图 10b)可以看出, 系统输出有功功率在波动时的超调量减少, 振荡幅度减弱, 暂态调整过程减少, 振荡幅度减少, 有功功率能快速跟随有功指令变化。分析来看, 本文所提控制策略能有效减弱有功指令变化带来的系统功率与频率的振荡, 提升系统鲁棒性。

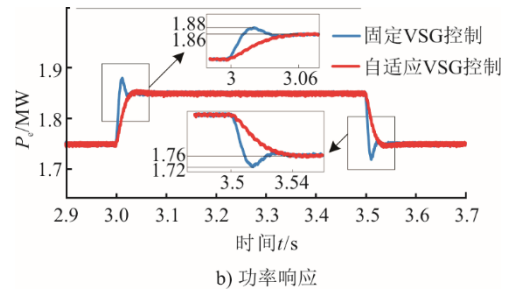
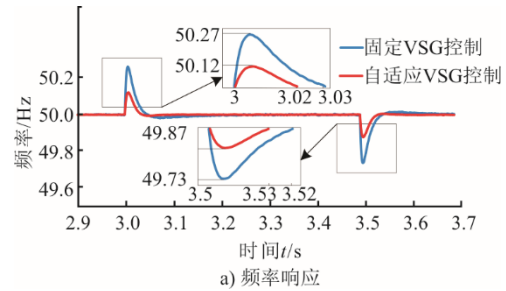


图 10 有功指令扰动下频率与功率响应  
Fig.10 Frequency and power response under active command disturbance

频率扰动下频率与功率响应如图 11 所示。由图 11a)可以看出, 与传统跟网型 VSG 控制相比, 输出频率振荡幅度减弱, 超调量减少, 暂态调整过程缩短, 系统性能得到提升。由图 11b)可以看出, 有功功率不再跟随有功指令, 但是在电网频率扰动下, 与传统跟网型 VSG 控制相比, 有功功率波动的超调量减少, 振荡幅度减弱, 暂态调整过程减少。分析来看, 本文所提控制策略能在电网频率波动时, 保持良好的抑制效果, 提升系统鲁棒性。

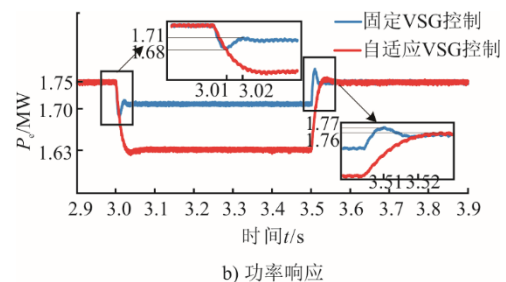
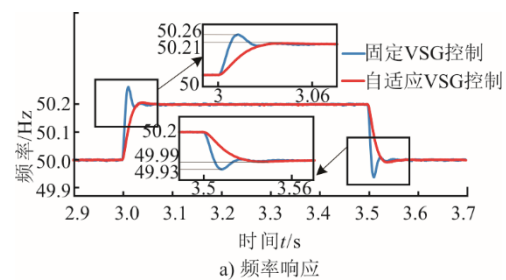


图 11 频率扰动下频率与功率响应  
Fig.11 Frequency and power response under frequency perturbation

图12为系统转动惯量与阻尼采用固定与自适应方式下的对比。由图12可知,在3s时有功率参考指令突增,3.5s时有功率参考指令恢复,在3s和3.5s时, $J$ 、 $D$ 处于自适应协同状态,通过转动惯量和阻尼系数的变化,减小系统频率超调与调节时间,提高系统暂态稳定性。

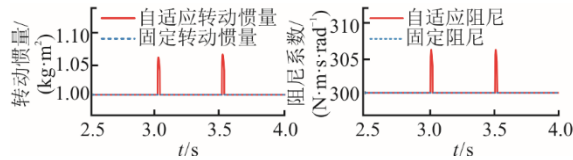


图12 转动惯量 $J$ 、阻尼 $D$ 的取值情况  
Fig.12 The values of moment of inertia  $J$  and damping  $D$

压强余量反馈系数如图13所示。

曲线1 系统开始时,风机出力大于网侧功率,电解槽工作,电解水制氢,氢气储存在储氢罐中,储氢罐中的压强开始上升,反馈系数增大。

曲线2 1.5s时储氢罐容量达到额定压强,电解槽停止工作。

曲线3 3s时有功率参考指令突增,燃料电池工作,消耗储氢罐中的氢气,反馈系数下降。

曲线4 3.5s时有功率参考指令恢复,燃料电池停止工作,电解槽重新工作,储氢罐中的氢气开始积累,反馈系数开始增加。

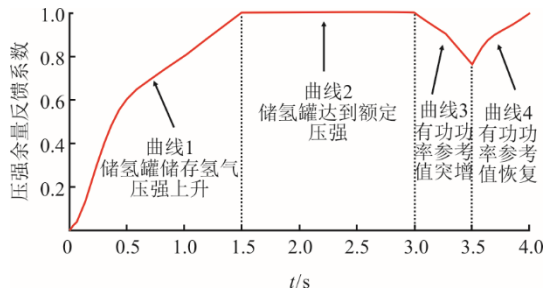


图13 压强余量反馈系数  
Fig.13 Pressure allowance feedback coefficient

## 5 结论

针对构网型风氢耦合系统功频振荡问题,提出了基于储氢系统压强反馈的自适应转动惯量 $J$ 的构网型VSG控制策略,通过MATLAB/SUMLINK进行系统建模仿真分析,得出以下结论。

1) 利用系统有功功率闭环传递函数根轨迹曲线以及有功功率指令阶跃扰动下的响应仿真波形来分析转动惯量与阻尼系数对有功功率振荡特性的影响。

2) 与传统跟网型固定参数VSG控制相比,本文所提控制策略能够进一步抑制频率振荡与输出有功功率振荡,并加快系统频率与功率的恢复,提升系统稳定性。

## [参考文献]

- [1] 刘钊汛, 秦亮, 杨诗琦, 等. 面向新型电力系统的电力电子变流器虚拟同步控制方法评述[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 1-16.  
LIU Zhaoxun, QIN Liang, YANG Shiqi, et al. Review on virtual synchronous generator control technology of power electronic converter in power system based on new energy[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 1-16.
- [2] 邸俊杰, 沈轶, 贾明祥, 等. 风氢耦合发电系统建模与分析[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 65-73.  
DI Junjie, SHEN Yi, JIA Mingxiang, et al. Modeling and analysis of wind-hydrogen coupled power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 65-73.
- [3] 何青, 沈轶. 风氢耦合储能系统技术发展现状[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 9-17.  
HE Qing, SHEN Yi. Development status of hydrogen energy storage system coupled wind power generation[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 9-17.
- [4] 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.
- [5] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.  
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [6] XU H Z, YU C Z, LIU C, et al. An improved virtual inertia algorithm of virtual synchronous generator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(2): 377-386.
- [7] ZHONG Q C. Power electronics-enabled autonomous power systems: next generation smart grids[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2020: 1.
- [8] 朱作滨, 孙树敏, 丁月明, 等. 基于自适应VSG控制策略永磁直驱风电系统研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 116-124.  
ZHU Zuobin, SUN Shumin, DING Yueming, et al. Research on PMSG wind power system based on adaptive VSG control strategy[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(1): 116-124.
- [9] RASETYO M B, WIJAYA F D, FIRMANSYAH E. Review on virtual synchronous generator model and control for improving microgrid stability[C]. 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), 2021, Chennai, India.
- [10] 王光宇, 付立军, 胡祺, 等. 计及电压环影响的虚拟同步发电机低频振荡阻尼分析与控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 177-184.

- WANG Guangyu, FU Lijun, HU Qi, et al. Analysis and control of low-frequency oscillation damping of virtual synchronous generator considering influence of voltage loop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 177-184.
- [11] 杨效, 曾成碧, 苗虹, 等. 优化虚拟同步发电机惯量和阻尼的自适应控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 495-504.
- YANG Xiao, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. Optimizing adaptive inertia and damping control strategy of virtual synchronous generator[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(11): 495-504.
- [12] 张祥宇, 朱正振, 王琛, 等. 风电高渗透虚拟同步电力系统的功角暂态稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 136-143.
- ZHANG Xiangyu, ZHU Zhengzhen, WANG Chen, et al. Transient stability analysis of power angle in virtual synchronous system with high wind penetration[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(2): 136-143.
- [13] 王继磊, 张兴, 朱乔华, 等. 虚拟同步发电机暂态稳定性分析与控制策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(12): 28-37.
- WANG Jilei, ZHANG Xing, ZHU Qiaohua, et al. Transient stability analysis and control strategy of virtual synchronizer generator[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(12): 28-37.
- [14] 张巍, 黄文, 帅智康, 等. 虚拟调速器对 VSG 暂态功角稳定影响机理分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 55-62.
- ZHANG Wei, HUANG Wen, SHUAI Zhikang, et al. Impact mechanism analysis of virtual governor on transient power angle stability of VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 55-62.
- [15] 程国栋, 劭宣, 王贵峰. 虚拟同步发电机参数自适应控制策略[J]. 可再生能源, 2021, 39(12): 1655-1661.
- CHENG Guodong, SHAO Xuan, WANG Guifeng. Parameter adaptive control strategy of virtual synchronous generator[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(12): 1655-1661.
- [16] 陈建, 任永峰, 云平平, 等. 基于 UDE 的虚拟同步发电机功频振荡抑制策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(12): 220-226.
- CHEN Jian, REN Yongfeng, YUN Pingping, et al. Power-frequency oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator based on UDE[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(12): 220-226.
- [17] 张福东, 朴政国, 郭裕祺, 等. VSG 转动惯量的自适应控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 93-100.
- ZHANG Fudong, PIAO Zhengguo, GUO Yuqi, et al. Research on adaptive control strategy of VSG rotational inertia[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(10): 93-100.
- [18] 杨帆, 邵银龙, 李东东, 等. 一种计及储能容量和 SOC 约束的模糊自适应 VSG 控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1869-1877.
- YANG Fan, SHAO Yinlong, LI Dongdong, et al. Fuzzy adaptive VSG control strategy considering energy storage capacity and SOC constraint[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1869-1877.
- [19] WANG L, WANG Y J, LIU C, et al. A power distribution strategy for hybrid energy storage system using adaptive model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 5897-5906.
- [20] 李怡, 李永丽, 李松, 等. 基于 VSG 的光伏及混合储能系统功率分配与虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 27-34.
- LI Yi, LI Yongli, LI Song, et al. Power distribution and virtual inertia control of photovoltaic and hybrid energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 27-34.
- [21] 孟建辉, 彭嘉琳, 王毅, 等. 考虑储能荷电状态及频率恢复特性的改进型灵活虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 100-107.
- MENG Jianhui, PENG Jialin, WANG Yi, et al. Improved flexible virtual inertial control considering SOC of energy storage and characteristics of frequency recovery[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 100-107.
- [22] 于晶荣, 孙文, 于佳琪, 等. 基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 137-144.
- YU Jingrong, SUN Wen, YU Jiaqi, et al. Virtual synchronous generator control of a grid-connected inverter based on adaptive inertia[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 137-144.
- [23] 马钦林, 杨欢, 屈子森, 等. 改善虚拟同步发电机阻尼特性的设计方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 269-275.
- MA Yilin, YANG Huan, QU Zisen, et al. Design method for improving damping characteristics of virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 269-275.
- [24] 金铭鑫, 王彤, 黄世楼, 等. 含储能型虚拟同步发电机的直驱风机并网系统自适应协调阻尼控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 170-177.
- JIN Mingxin, WANG Tong, HUANG Shilou, et al. Adaptive coordinated damping control strategy for grid-connected direct-driven wind turbine system with energy storage-based virtual synchronous generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 170-177.
- [25] WU H, WANG X. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1034-1049.

(责任编辑 邓玲惠)