

制氢系统对双馈风机串补系统次同步振荡特性的影响

鲁亚楠¹, 徐涛^{1,2*}, 刘泽楠¹

(1. 内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010051; 2. 大规模储能技术教育部工程研究中心, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010080)

Effect of Hydrogen Production System on Sub-Synchronous Oscillation Characteristics of Doubly Fed Induction Generator Systems With Series Compensation

LU Yanan¹, XU Tao^{1,2*}, LIU Zenan¹

(1. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia Autonomous Region, China; 2. Engineering Research Center of Large Energy Storage Technology, Hohhot 010080, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

摘要:【目的】规模化风电机组的并网运行增加了系统发生次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)的风险, 针对此问题, 深入分析了制氢系统对风电系统SSO特性的影响。【方法】首先, 搭建双馈风电系统、串补输电系统和制氢系统模型; 然后, 在此基础上, 根据制氢系统电解槽内部热动力和电化学动态特性, 在PSCAD/EMTDC仿真平台建立制氢装置的电磁暂态模型; 最后, 将其加入到双馈风电经串补外送系统中进行时域仿真分析。【结果】制氢系统在特定的控制参数下会参与到系统的次同步振荡中, 制氢系统加入到风电远距离输送系统能在一定程度上缓解并网系统SSO, 从而提供一种解决SSO问题的新思路。【结论】制氢系统的投入提高了风氢耦合并网系统的阻尼, 改善了系统稳定性。

关键词: 新能源; 氢能; 风电机组; 制氢系统; 次同步振荡(SSO); 双馈风机; 串联补偿; 特征值分析法; 时域仿真

ABSTRACT: [Objectives] The grid-connected operation of large-scale wind turbines increases the risks of sub-synchronous oscillation (SSO) in power systems, to address these issues, this study conducts an in-depth analysis of the effect of hydrogen production systems on the characteristics of SSO of wind power system. [Methods] Firstly, the models of doubly fed induction generator system, series-compensated

transmission system, and hydrogen production system are established. Building on this, based on the internal thermodynamic and electrochemical dynamic characteristics of the electrolyzer in the hydrogen production system, an electromagnetic transient (EMT) model of the hydrogen production device is established on the PSCAD/EMTDC simulation platform. Finally, it is integrated into a doubly fed induction generator with series compensation for external transmission to conduct time-domain simulation analysis. [Results] The hydrogen production system participates in the SSO of the system under specific control parameters. The integration of the hydrogen production system into the long-distance transmission system of wind power—as a clean energy solution—can mitigate SSO in the grid-connected system to a certain extent, thereby offering a new approach to addressing SSO issues. [Conclusions] The integration of the hydrogen production system improves the damping of the wind-hydrogen coupled grid-connected system, leading to improved system stability.

KEY WORDS: new energy; hydrogen energy; wind turbines; hydrogen production system; sub-synchronous oscillation (SSO); doubly fed induction generator; series compensation; eigenvalue analysis; time-domain simulation

0 引言

在“双碳”目标的驱动下, 我国顺应全球绿色低碳发展趋势, 构建以新能源为主体的新型电力系统, 但大规模、远距离风电经串补系统外送增加了系统发生次同步振荡(sub-synchronous

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2023LHMS05049); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20240014)。

Inner Mongolia Autonomous Region Natural Science Foundation (2023LHMS05049); Basic Scientific Research Fund for Universities Directly under the Inner Mongolia Autonomous Region (JY20240014).

oscillation, SSO)的风险, 对系统的安全稳定运行产生了负面影响^[1-3]。此外, 由于地区之间管廊容量的限制, 风能会出现无法消纳的问题, 使风电场出现严重的弃风现象。氢能作为一种新型的储能技术, 具有低碳清洁、能量密度大等优势, 是实现能量储存的最佳选择^[4-8]。

近年来大规模风电机群接入电网引发的次同步振荡问题引起了广泛关注。2009年美国得克萨斯州发生大量风电机组脱网以及crowbar损坏的次同步振荡事故^[9]。2012年底我国华北一集群风电场机组网侧电流中含有6~8 Hz次同步频率分量, 导致部分风电机组脱网^[10]。文献[11]搭建双馈风电场并接入串补交流系统的等效模型, 通过仿真复现了次同步谐振(sub-synchronous resonance, SSR)现象, 并利用特征根方法分析其主导因素为风速、风机并网数量以及控制方式, 揭示了双馈异步风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG)次同步振荡的产生机理。文献[12]借助理论与实际风场数据分析风电机组与串补系统相互作用引起的次同步振荡特性, 揭示次同步控制相互作用(sub-synchronous control interaction, SSCI)产生的主要原因是DFIG在次同步频率下具有负阻尼特性, 分析结果表明、风电机组的振荡频率随着电网运行方式及发电机数量的不同而变化。

国际上氢能研究的相关学者提出了可再生能源发电制氢协同传统发电方式, 风电富集地区的大规模风电并网与制氢系统相互协调配合, 将明显改善规模化风电并网对电力系统的影响^[13]。利

用风氢耦合系统改善风电质量较之改造较为薄弱的末端电网更为经济, 方案也可行。文献[14]搭建1.5 MW风电制氢储能模型, 研究了氢储能系统能量传输机理, 通过试验验证了风电制氢可有效平抑风电输出功率的波动。文献[15-16]提出一种利用可再生能源制氢系统抑制新能源并网系统次同步振荡的方法。

目前针对制氢系统对SSO特性的影响分析的研究较少, 因此本文主要针对制氢装置对双馈风机串补输电系统SSO特性的影响进行研究。首先, 利用小信号分析法分析基于制氢系统下双馈风机经串补外送系统发生SSO的机理; 然后, 计算系统的特征值和相关因子, 确定主导SSO模态的系统状态变量, 并研究相关参数对系统SSO影响的程度; 最后在PSCAD/EMTDC仿真软件中进行时域仿真, 验证特征值分析法的理论分析结果。

1 风氢耦合并网系统建模

1.1 系统模型

本文基于河北省沽源县某风电场串补外送系统的局部拓扑建立等效风机并网模型, 为研究制氢系统对串补系统发生次同步振荡的影响, 选取风电场出口作为制氢系统安装的位置, 模型如图1所示。风电场由100台型号相同、控制参数以及运行状态一致的5 MW双馈风电机组成, 每台机组配一台变压器, 风机经机端变压器(0.9 kV/0.69 kV/35 kV)升压到35 kV集电线路, 然后经(35 kV/500 kV)升压变压器和串补系统接入到交流

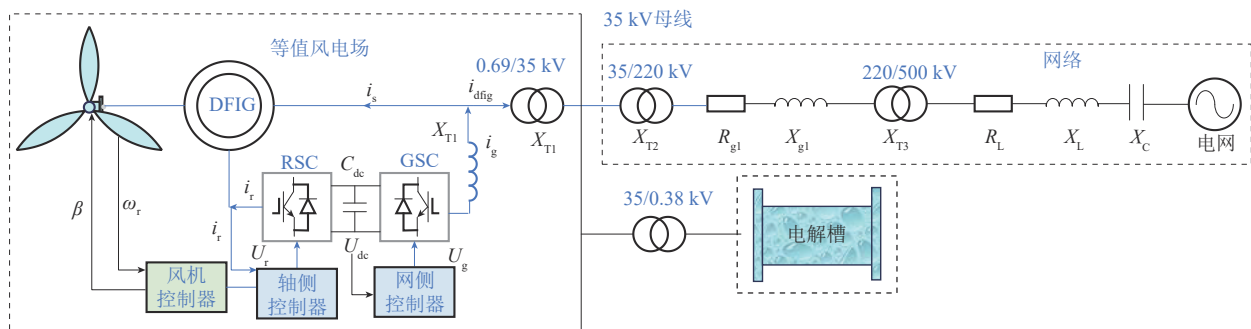


图1 风氢耦合串补并网系统图

Fig. 1 Diagram of wind-hydrogen coupled grid-connected system with series compensation

电网中^[17]。根据此系统结构建立系统的动态模型，主要参数如表 1 所示。

表 1 系统主要参数

Tab. 1 System main parameters

参数	数值	参数	数值
额定电压 P_N/MW	5	额定电压 U_N/kV	0.69
定子绕组电阻 R_s/pu	0.005 4	风机定转子比例系数 $K_{p1}-K_{p8}$	2
转子绕组电阻 R_r/pu	0.006 07	风机定转子积分系数 $T_{i1}-T_{i8}$	0.05
定子漏电感 L_s/pu	0.10	制氢系统外环比例系数 K_{p9}	2
转子漏电感 L_r/pu	0.11	制氢系统外环积分系数 T_{i9}	0.05
励磁电感 L_m/pu	4.5	制氢系统内环比例系数 K_{p10}	1
串补电容 C/pu	378.954	制氢系统内环积分系数 T_{i10}	0.05
额定电压 U_N/kV	0.69		

1.2 双馈风机模型

双馈风机的感应发电机在风能的推动下运转，定子直接并网，转子绕组通过 AC-DC-AC 变换器接入电网^[18]。换流器包括转子侧换流器和网侧变换器，连接换流器的直流电容具有稳压作用，转子绕组中施加变频电流实现双馈风机的变速恒频控制。风电场由多台风机构成，具体分析中很难

对每台风机进行研究，通常采用风电场动态集总参数建模，其实质是将风场内各机组的参数、容量、有功功率与无功功率简单相加进行等值，从而聚合成一台风力发电机来代替整个风电场^[19]。

1.3 可再生能源制氢系统

1.3.1 制氢系统整体构架及电解槽电能拓扑变换

风氢耦合并网系统由双馈风电场、可再生能源制氢系统以及串补输电系统组成，其中可再生能源制氢系统包含变流器、电解槽、热管理系统、供水系统、储氢系统等部分^[20]。风氢耦合并网系统结构如图 2 所示。风电制氢系统以双馈风力发电机作为能源输入端，借助电解槽将水分解为氢气和氧气，通过液汽分离装置分离氢气，随后将生成的氢气安全储存于储氢罐^[21]。制氢的容量取决于电网的需求量，当电网对电能需求较高时，风能直接通过串联补偿输电线路送入电网以满足高负荷的需求；当电网对电能的需求减少时，电网对风能的消纳也会降低，利用弃风电量进行大规模电解水制氢可以更好地利用风能资源^[22]。

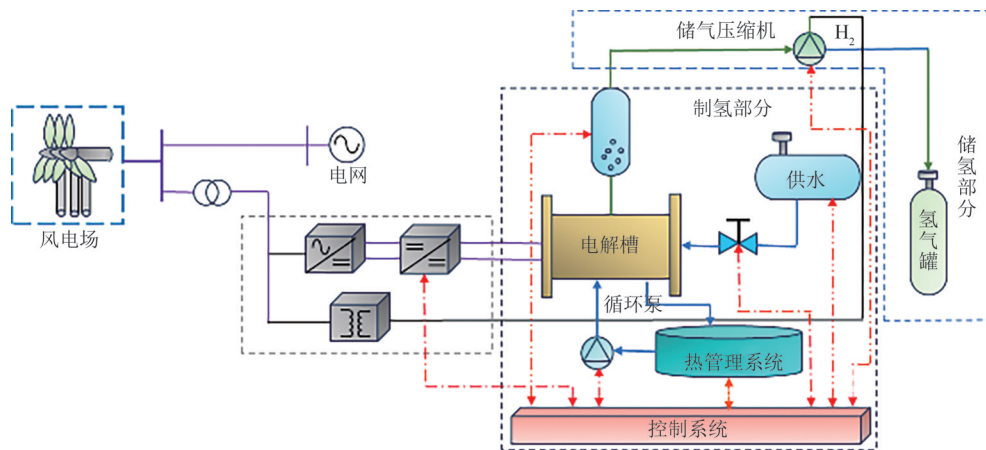


图 2 可再生能源制氢系统整体构架

Fig. 2 Overall architecture of renewable energy hydrogen production system

1.3.2 电解制氢系统数学模型

由于 SSO 主要与风电机组变换器、串补系统以及制氢系统之间相互作用有关，为了准确研究 SSO 的特性，建立风电机组变换器、串补系统以及制氢系统的数学模型，其中制氢系统、风力机和机械传动系统、感应发电机系统、串联补偿电容输电线路以及定、转子侧换流器和其对应控制系统的数学模型参见文献[23]。

在电解制氢过程中，电解槽的运行需要满足

一个特定的理论分解电压，即为电解单元在正常工作状态下所需的电压。实际上，由于电解过程的不完全可逆性，电解室的实际电压将超过理论分解电压。这部分超出的电压包括在降低电解室效率时产生的过电压以及与电解槽欧姆损耗相关的欧姆电压^[24]。电解室的单体电压表示为

$$V_{\text{cell}} = V_{\text{ocv}} + V_{\text{ohm}} + V_{\text{act}} + V_{\text{con}} \quad (1)$$

式中： V_{ohm} 为欧姆过电压； V_{act} 为活化过电压； V_{con} 为浓度差过电压； V_{ocv} 为开路电压。

多个单体电解室级联后组成电解槽堆，每个电解槽包括 N_s 个电解小室：

$$V_{oc} = N_s V_{cell} \quad (2)$$

式中 V_{oc} 为电解槽电压。

开路电压可由能斯特方程推得：

$$V_{ocv} = E_o + \frac{RT}{2F} \left[\ln \left(\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{\alpha_{H_2O}} \right) \right] \quad (3)$$

式中： E_o 为电池可逆电压； p_{H_2} 、 p_{O_2} 为氢气、氧气分压； R 为气体常数； T 为电解槽温度； F 为法拉第系数； α_{H_2O} 为电极与膜间的水活度(液态水为1)。标况下的可逆电压为

$$E_o = 1.229 - 0.9 \times 10^{-3} (T - 298) \quad (4)$$

活化过电压为

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (5)$$

式中： i_0 为交换电流密度； i 为电流密度； α 为传递系数。

浓度差过电压是由反应物浓度变化导致的压降：

$$V_{con} = V_{con}^{an} + V_{con}^{cat} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{C_{O_2}^{mem}}{C_{O_2,0}^{mem}} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{C_{H_2}^{mem}}{C_{H_2,0}^{mem}} \right) \quad (6)$$

式中： $C_{O_2}^{mem}$ 、 $C_{H_2}^{mem}$ 分别为膜界面氧气和氢气的摩尔浓度； V_{con}^{an} 、 V_{con}^{cat} 分别为阳极浓度差过电压和阴极浓度差过电压；下标0表示阳极浓度差过电压参考工作条件。

欧姆过电势与电流成线性比例关系为

$$V_{ohm} = R_{cell} I \quad (7)$$

式中： R_{cell} 为有效欧姆电阻； I 为电流。

2 电解槽电能变换拓扑及其控制策略

利用小信号分析法分析系统的次同步振荡特性，需要建立双馈风机的数学模型。双馈风机并入串补并网系统的数学模型主要包括轴系模型、感应发电机、AC-DC-AC变流器模型、串联电容补偿线路模型。由于文献[25]建立了详细的双馈风机串补系统的数学模型，故本文不过多赘述，主要针对制氢系统的小信号建模进行分析。

2.1 工作原理

2.1.1 系统模型

低压制氢系统电磁暂态模型如图3所示，制氢系统中的功率转换模块将适当的电压从交流变换为直流向电解槽供电，整流部分采用三相电压型整流器(three-phase voltage source rectifier, TPVSR)脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)电路，DC-DC变换电路选择采用隔离型副边为倍流整流电路的移相全桥变换器(phase-shift full bridge converter with current doubler rectifier, PSFBCDR)。制氢系统通过DC-DC控制回路接入电网，DC-DC控制环节采用的是传统双闭环PI控制，内环为电流环，外环为电压环，控制结构如图4所示。外环电压通过比较电解槽电压参考值 V_{ref} 与测量值 $V_{measure}$ ，经过PI调节器输出电感电流参考值 I_{L1ref} ，然后将所得值与实际值 I_{L1} 进行比较，经过PI控制器输出变压器原边的移相角 d 再

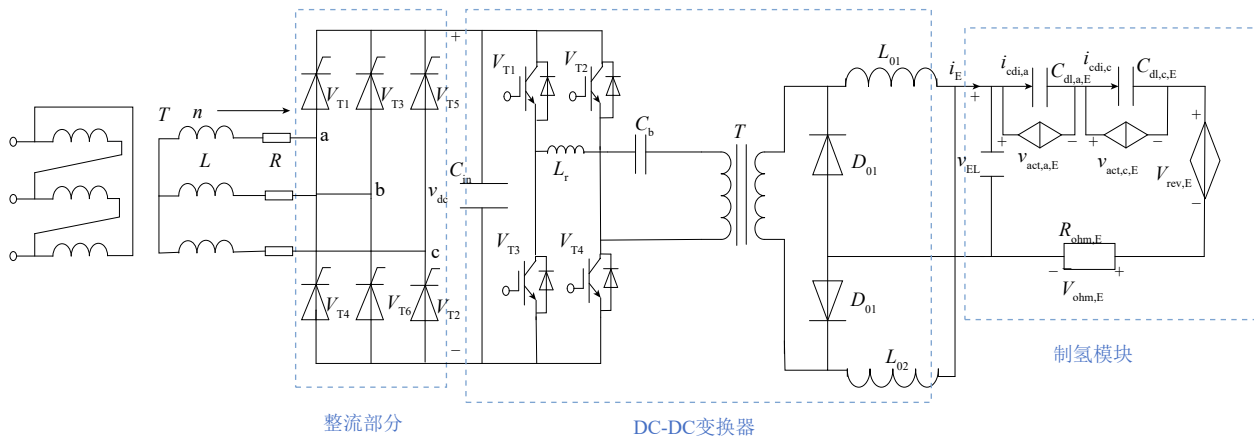


图3 低压制氢系统电磁暂态模型

Fig. 3 Electromagnetic transient model of low-voltage hydrogen production system

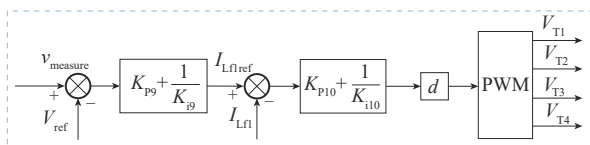


图4 移相全桥变换器控制框图

Fig. 4 Block diagram of control of phase-shift full bridge converter

驱动信号控制S1—S4。

2.1.2 TPVSR的数学模型

TPVSR具有复杂的三相耦合非线性动态特性，仅使用PI控制器难以达到零稳态误差的控制效果。为了解决这个问题，可以将三相静止坐标系中的基波正弦量转化为两相dq坐标系中的直流量，实现对三相电流的精确跟踪和控制。三相电压型PWM电路在dq系中的数学模型表达式为：

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -R & \omega L \\ \omega L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \\ C \frac{dv_{DC}}{dt} = \begin{bmatrix} d_d & d_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{R_L} v_{DC} \end{cases} \quad (8)$$

式中： i_d 、 i_q 、 e_d 、 e_q 、 d_d 、 d_q 分别为电网电流、电网电压以及占空比在d、q轴的分量； v_{DC} 为直流母线电压；L为滤波电感；R为滤波电感寄生电阻； R_L 为负载电阻。

2.1.3 PSFBCDR的数学模型

电解制氢系统具有低电压大电流的负载特性，考虑到变换器能量转化效率以及电路的可靠性，选取隔离型副边为倍流整流电路的移相全桥变换器拓扑，PSFBCDR的数学模型为：

$$\begin{cases} \frac{di_{L_{f1}}}{dt} = \frac{1-d}{2nL_{f1}} v_{DC} - \frac{1}{L_{f1}} v_{EL} \\ \frac{di_{L_{f2}}}{dt} = \frac{1-d}{2nL_{f2}} v_{DC} - \frac{1}{L_{f2}} v_{EL} \\ \frac{dv_{EL}}{dt} = \frac{1}{C_o} i_{L_{f1}} + \frac{1}{C_o} i_{L_{f2}} - \frac{1}{C_o} i_{EL} \end{cases} \quad (9)$$

式中： C_o 为变流器输出电容； L_{f1} 与 L_{f2} 为副边滤波电感； v_{EL} 为电解槽电压； i_{EL} 为电解槽电流； $i_{L_{f1}}$ 、 $i_{L_{f2}}$ 分别为 L_{f1} 与 L_{f2} 流过的电流。

2.2 小信号模型

对上述各部分的动态方程进行线性化处理，消除中间变量，可得到基于制氢系统的双馈风机并网系统的小信号模型为

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A\Delta X \quad (10)$$

式中：A为特征值系数矩阵； ΔX 为状态变量。各系统的状态变量如表2所示。

表2 状态变量

Tab. 2 State variables

状态变量	分类
$\Delta\omega, \Delta\omega_r, \Delta\theta$	轴系模型
$\Delta E'_d, \Delta E'_q, \Delta i_{sd}, \Delta i_{sq}$	感应发电机
ΔU_{dc}	直流母线
$\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3, \Delta z_4$	变流器转子侧
$\Delta i_{gd}, \Delta i_{gq}, \Delta z_5, \Delta z_6, \Delta z_7$	变流器网侧
$\Delta u_{cd}, \Delta u_{cq}, \Delta i_{id}, \Delta i_{iq}, \Delta u_{cd}, \Delta u_{cq}$	串联补偿线路
$\Delta i_d, \Delta i_q, \Delta v_{EL}, \Delta i_{L_{f1}}, \Delta i_{L_{f2}}, \Delta v_{DC}$	制氢系统

2.3 小信号模型验证

线路的串补度为30%，设置风机的风速为11 m/s，制氢系统的容量为16 MW，制氢系统的控制器参数设置为 $K_{p9}=2$ ， $T_{i9}=0.05$ ，求解特征值之前，基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件搭建图1所对应的时域仿真模型，获得系统在不同工况下系统的初始状态以及各相关变量的稳态运行初始点。利用Matlab编程，计算双馈风电系统状态矩阵的特征值，除去非振荡模态，状态矩阵特征值的计算结果如表3所示。

表3 系统振荡模态

Tab. 3 System oscillation modes

模态序号	特征值	振荡频率/Hz
$\lambda_{1,2}$	$-38.12 \pm j1690.89$	269.11
$\lambda_{3,4}$	$-67.39 \pm j701.47$	111.64
$\lambda_{7,8}$	$-18.87 \pm j381.39$	60.7
$\lambda_{9,10}$	$0.89 \pm j238.46$	37.95
$\lambda_{15,16}$	$-1.542 \pm j8.65$	1.38
$\lambda_{21,22}$	$-36.93 \pm j1.16$	0.185

表3仅列出共轭复根的特征值，其余的特征根为负实数，与系统的振荡模态无关，因此不进行分析。由表3可知，待研究系统6对共轭复数特征根代表6个振荡模态，其中，模态 $\lambda_{7,8}$ 在超同步频率范围之内，模态 $\lambda_{9,10}$ 在次同步振荡范围之内，本文的主要研究对象是次同步振荡频段的振荡，模态 $\lambda_{9,10}$ 的特征值实部大于0，属于不稳定的次同步振荡模态，振荡频率为37.95 Hz，进一步对该模态进行灵敏度分析，得到影响该模态的主要参与因子如图5所示。

由图5分析结果可知，对次同步振荡模态影

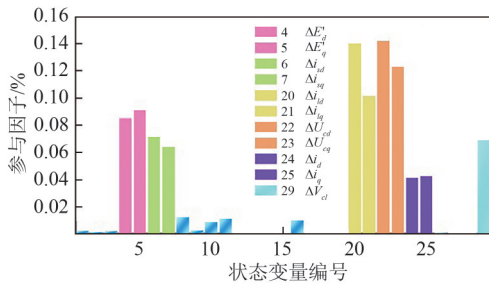


图5 参与因子

Fig. 5 Participation factors

响较大的是风电机组的变流器、制氢系统以及交流输电线路的状态变量，振荡频率为37.95 Hz的模态是由双馈发电机与制氢系统组成的风氢耦合系统和串补输电线路相互作用引发的次同步控制相互作用。笔者通过前期的研究已经得到一些结论，研究发现：当风速越低或者串补度越高时，风机发生次同步振荡的风险越大。此外，转子侧内环变流器(rotor-side converter, RSC)对系统SSO特性的影响较大，该系数越小系统越稳定。但是该系数降到一定程度，电流跟踪效果会变差，变流器性能降低，并不能从根本上解决SSO问题。图6为风氢耦合并网系统发生次同步振荡现象时电解槽直流电流的波形。由图7所示直流电流快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析结果可知，电解槽的直流电流存在38 Hz的振荡分量，制氢系统自身的振荡频率与系统的振荡频率

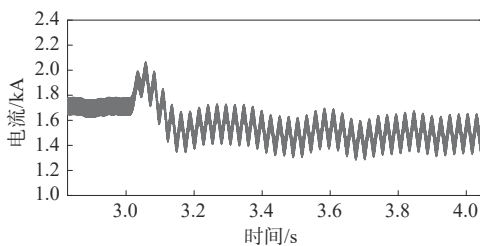


图6 电解槽直流电流波形

Fig. 6 DC current waveform of electrolyzer

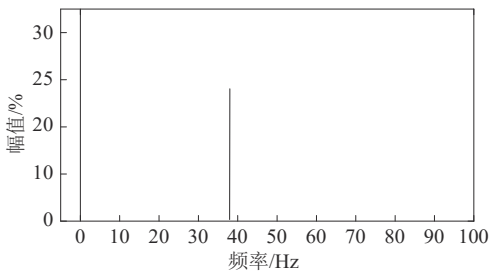


图7 电解槽直流电流FFT分析

Fig. 7 FFT analysis of DC current in electrolyzer

接近，与理论分析一致。

3 风氢耦合并网系统次同步振荡的影响因素分析

3.1 理论分析

图8为制氢系统侧控制器参数 $K_{p9}=0.5$ ， $K_{i9}=20$ 时，风电场在不同串补度下，含制氢与不含制氢系统次同步振荡模态的阻尼比。

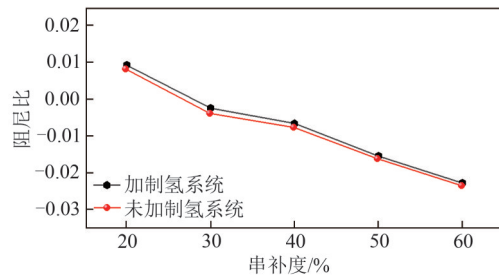


图8 不同串补度下的阻尼比

Fig. 8 Damping ratio at different degrees of series compensation

改变制氢系统控制参数时，分析制氢系统动态特性对全系统次同步振荡模态的影响，制氢系统的控制环节如图4所示，通过仿真分析可知，电流内环对次同步振荡的影响较小，故不对其作过多赘述，只对外环参数进行分析。选取电压外环的比例系数 $K_{p9}=0.5$ ，目前整个系统呈现弱阻尼的状态，采用控制变量法， $K_{i9}=1/T_{i9}$ 从20变化到100，系统次同步振荡模态特征根随 K_{i9} 变化的轨迹如图9所示。分析图9可得，随 K_{i9} 的增大，特征根的实部先逐渐增大到某一数值后又逐渐减小。由于 K_{i9} 的增加使得制氢系统振荡频率与主系统风电场输出功率的次同步振荡频率接近，对系统次同步振荡产生影响。

选取功率外环积分系数 $K_{i9}=80$ ，制氢系统的

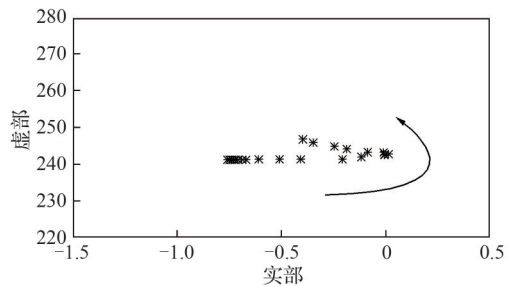


图9 K_{i9} 变化时次同步振荡模式的根轨迹

Fig. 9 Root locus of SSO mode with varying K_{i9}

振荡频率与系统的次同步振荡频率接近。 K_{p9} 从0.5增大到5,系统振荡模态的特征根轨迹变化如图10所示。随着 K_{p9} 的增大,特征根的实部逐渐增大,通过阻尼比的计算,制氢系统的输出特性呈现弱阻尼特性,使得制氢系统参与到系统振荡模态中,从而影响到系统的次同步振荡特性。

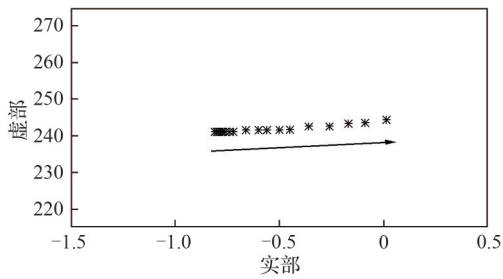


图10 K_{p9} 变化时次同步振荡模式的根轨迹

Fig. 10 Root locus of SSO mode with varying K_{p9}

3.2 仿真分析

3.2.1 不同串补度对耦合系统SSO的影响

采取单变量的方法研究不同串补度对耦合系统次同步振荡的影响,控制器参数不变,与表1保持一致。保持初始条件不变,系统在3 s时投入串补,串补度分别为20%、30%、40%,不同串补度下风氢耦合并网系统阻尼比变化如表4所示,风机输出功率如图11所示。

表4 特征值计算结果

Tab. 4 Calculation results of eigenvalues

工况	串补度	特征值	阻尼比
未投制氢系统	20%	$-2.01 \pm j241.83$	0.008 3
	30%	$0.91 \pm j238.70$	-0.003 8
	40%	$1.79 \pm j235.17$	-0.007 6
投制氢系统	20%	$-2.86 \pm j242.67$	0.011 8
	30%	$0.54 \pm j239.96$	-0.002 3
	40%	$1.56 \pm j235.46$	-0.006 6

由表4特征值分析结果可知,串补度为20%时,制氢系统的加入使阻尼比由0.008 3变为0.011 8,表明制氢系统对风氢耦合并网系统次同步振荡有一定的抑制作用,提高了系统稳定性。随着串补度的提高,串补度为30%时与不含制氢系统时阻尼特性类似,虽然阻尼比有所提高,但系统的阻尼比依然由正变为负,系统逐渐失去稳定。随着串补度增加,负阻尼特性增强,振荡频率降低的同时振荡的剧烈程度也相应增加。当串

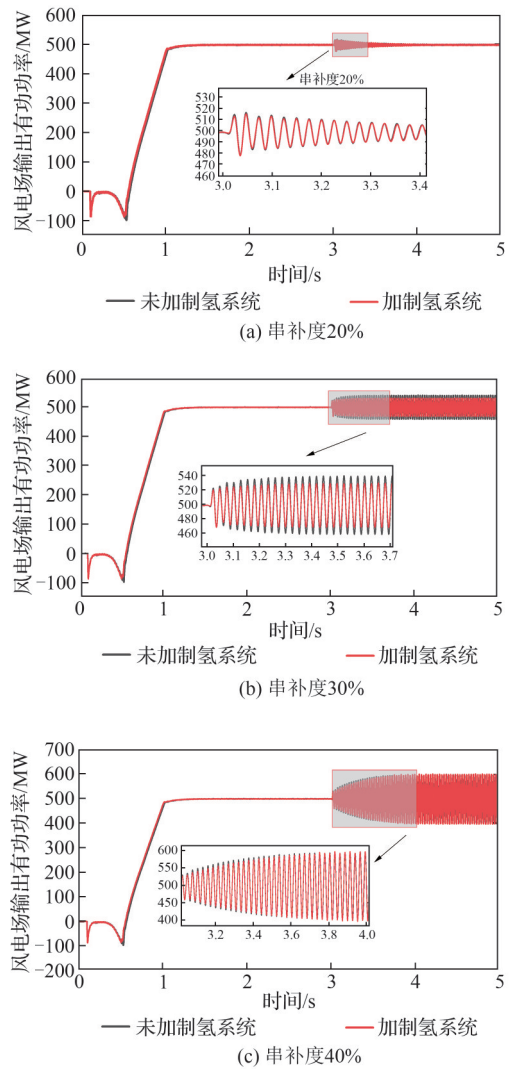


图11 串补度对输出功率的影响

Fig. 11 Effect of series compensation degree on output power

补度达到40%时,阻尼比依然呈现负阻尼特性,加入制氢系统前后阻尼特性虽然变化较小,但阻尼比依然增高,说明串补度较高时,制氢系统的投入会提高系统稳定性,但次同步振荡的剧烈程度导致制氢系统的作用微乎其微。

初始条件不变,由图11可知,与未投制氢系统的振荡特性类似,系统的振荡幅值随着串补度增加由收敛变为发散,系统稳定性变差;但是制氢系统的投入使系统稳定性得到改善。由图11(a)可得,串补度为20%时,串补度对系统的影响较小,制氢系统的投入使风电场输出功率迅速衰减,达到稳定运行状态,振荡持续的时间变短。由图11(b)可得,串补度为30%时,系统仍处于等

幅振荡，但系统振荡功率的幅值明显变小，系统稳定性增强。由图 11(c)可得，串补度持续增加，系统振荡更为剧烈，由等幅振荡逐渐变为发散振荡，系统振荡频率降低，稳定性变弱；此时由于风氢耦合并网系统较强的振荡特性使得制氢系统的作用不大，只对风电场输出功率最初的发散阶段起作用，等幅振荡阶段与未加制氢系统的效果一样。

3.2.2 RSC 内环比例系数对耦合系统 SSO 的影响

由振荡模态分析可知，次同步振荡模态中参与因子较高的是转子侧换流器的状态变量，但由于网侧变换器的影响较小，而且风机 RSC 电流内环的 PI 参数对次同步振荡的灵敏性要强于功率外环，且比例系数的影响强度更大。因此只分析 RSC 内环比例系数对风氢耦合系统次同步振荡的影响。初始条件不变，转子侧变流器内环比例系数为 0.8、1.2、1.6、2.0 时风氢耦合并网系统的特征值计算结果如表 5 所示，相应比例系数的仿真结果如图 12 所示。

表 5 特征值计算结果

Tab. 5 Calculation results of eigenvalues

工况	K_{p3}	特征值	阻尼比
未投制氢系统	0.8	$-2.1 \pm j235.91$	0.009
	1.2	$-1.32 \pm j236.84$	0.005 8
	1.6	$0.51 \pm j238.12$	-0.002 1
	2.0	$0.9 \pm j238.70$	-0.003 8
投制氢系统	0.8	$-2.8 \pm j236.34$	0.012
	1.2	$-1.74 \pm j237.26$	0.007 3
	1.6	$0.38 \pm j238.58$	-0.001 6
	2.0	$0.89 \pm j238.96$	-0.002 3

由表 5 分析可得，与不含制氢系统的阻尼变化规律相同，RSC 内环比例系数 K_{p3} 增加时，系统次同步振荡模态实部由负变正，阻尼比由正变负，系统逐渐失稳。结合图 12 可以得到，制氢系统接入电网会让系统出现短时间的波动；由图 12(a)与 12(b)可知，当 K_{p3} 为 0.8 和 1.2 时，电流内环的比例系数较小，与未投入制氢系统的振荡特性相同，功率振荡的幅值逐渐收敛，制氢系统的投入使振荡幅值减小，而且振荡持续时间有所缩短；由图 12(c)与图 12(d)可知，当 K_{p3} 为 1.6 和 2.0 时，功率振荡的频率增加，风氢耦合并网系统较强的振荡

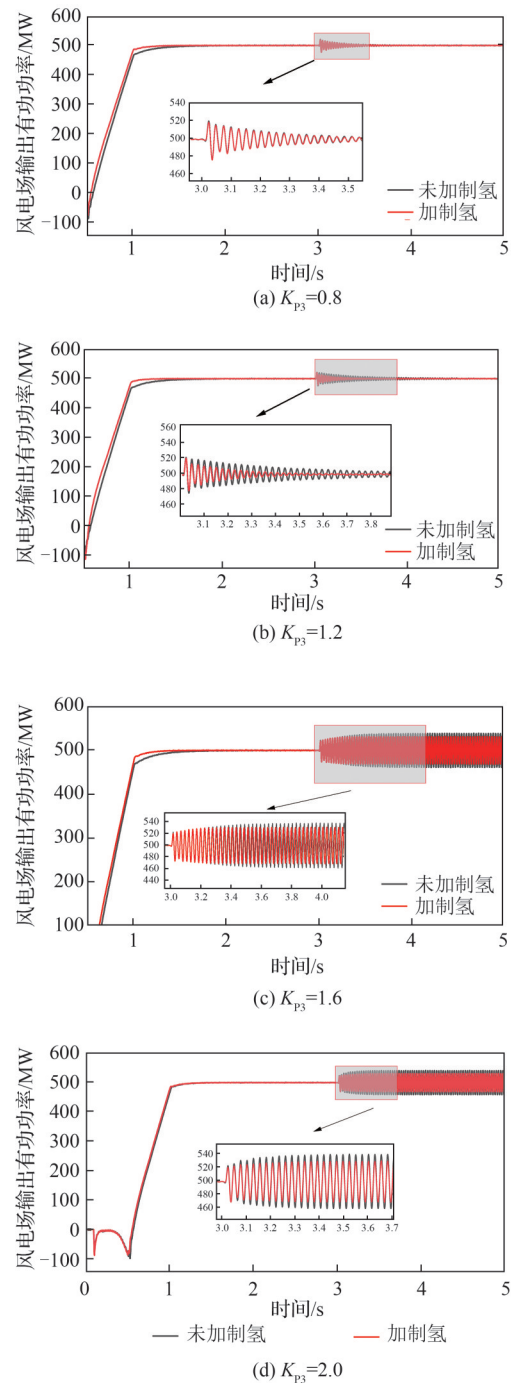


图 12 RSC 内环增益对输出功率的影响

Fig. 12 Effect of RSC inner loop gain on output power

特性使得制氢系统发挥其优势，次同步振荡的幅值减小，验证了特征值结果的正确性。

3.2.3 制氢系统容量对耦合系统 SSO 的影响

初始运行条件不变，系统控制器参数如表 1 所示，上述分析的制氢系统按照装机容量为 3% 进行配置。为了有效利用被弃风能，与电网互联的制氢系统容量需要动态调整。本文制氢系统容量

以10 MW为等步长,从10 MW变化到120 MW,图13为制氢系统容量改变时次同步振荡模式的根轨迹变化。

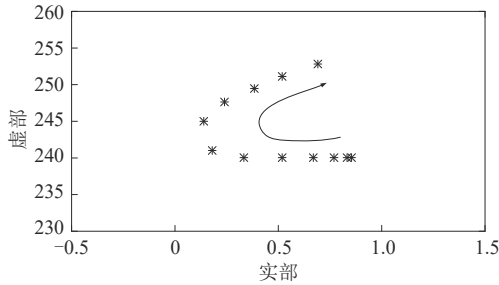


图13 制氢容量变化次同步振荡模式的根轨迹

Fig. 13 Root locus of SSO mode with varying hydrogen production capacity

由图13的根轨迹可知,随着制氢容量的增加,特征根实部逐渐变小,当制氢系统容量达到70 MW后,特征值实部逐渐增大;根轨迹变化过程中,特征根实部先减小后增大,但是数值一直为正,系统阻尼比为负,说明当制氢系统小于70 MW时,随着制氢容量的增大,系统的稳定性增强,但系统次同步振荡模态一直存在;当制氢系统大于70 MW时,随着制氢容量的增加,系统逐渐不稳定,且系统的振荡频率随制氢容量的增加而逐渐增大。

根据图13的根轨迹分析,制氢系统容量配置主要分为3个场景:

1) 场景1。电网对风电场输出电能的最大消纳值为470 MW,理想状态下不考虑系统损耗且风电机组满发,利用弃风电量30 MW进行电解水制氢,此工况下风电场有功输出如图14所示。

2) 场景2。电网对风电场输出电能的最大消纳值为430 MW,利用弃风电量70 MW进行电解

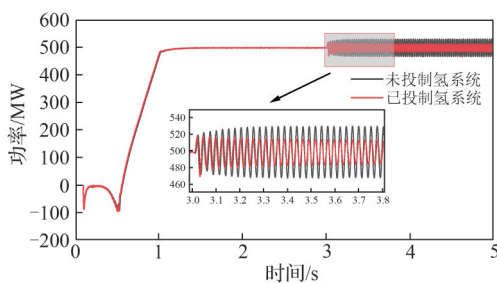


图14 制氢系统容量30 MW对有功输出的影响

Fig. 14 Effect of 30 MW hydrogen production system capacity on active power output

水制氢,此工况下风电场有功输出如图15所示。

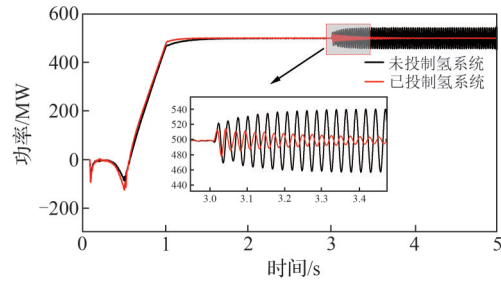


图15 制氢系统容量70 MW对有功输出的影响

Fig. 15 Effect of 70 MW hydrogen production system capacity on active power output

3) 场景3。电网对风电场输出电能的最大消纳值为380 MW,利用弃风电量120 MW进行电解水制氢,此工况下风电场有功输出如图16所示。

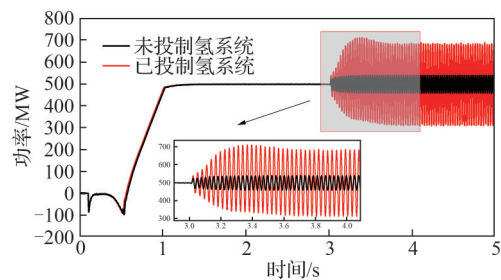


图16 制氢系统容量120 MW对有功输出的影响

Fig. 16 Effect of 120 MW hydrogen production system capacity on active power output

由图14可知,容量为30 MW制氢系统在 $t=0$ s与电网互联,风电场输出功率会出现短时波动; $t=3$ s时投入串补系统,与未投入制氢系统时风电场有功输出相比,制氢系统的投入使次同步振荡的幅值减小。

由图15可知,容量为70 MW制氢系统在 $t=0$ s与电网互联,风电场输出功率会出现短时波动; $t=3$ s时投入串补系统,与未投入制氢系统时风电场有功输出相比,制氢系统的投入使系统固有次同步振荡的发散速率以及振荡幅值都减小。

由图16可知,容量为120 MW制氢系统在 $t=0$ s与电网互联,风电场输出功率会出现短时波动; $t=3$ s时投入串补系统,与未投入制氢系统时风电场有功输出相比,制氢系统的投入使系统固有次同步振荡变得更为剧烈,系统失去稳定性。

综上所述,制氢系统与电网互联时导致系统

功率出现短时间的波动，而且制氢系统的投入使系统固有次同步振荡的发散速率以及振荡幅值都减小。制氢系统容量越大，系统的稳定性越好，缓解次同步振荡的效果越好，但是当制氢系统达到某一临界值时，制氢系统容量越大，系统越不稳定，加剧了次同步振荡的发生。

4 结论

提出了一种将制氢系统加入风电串补系统的新思路，分析了其抑制新能源并网系统次同步振荡的有效性，结论如下：

1) 当制氢系统控制参数设置不合适时，制氢系统的振荡模式将呈现弱阻尼状态；当制氢系统的固有振荡频率与并网系统频率接近时，制氢系统与风电机组强耦合，制氢系统将参与系统的次同步振荡，从而影响系统的次同步振荡特性。

2) 与未投制氢系统相比，制氢系统的投入使不同串补度工况、不同RSC内环比例系数工况下耦合系统的阻尼比变高，稳定性增强。通过分析制氢容量对耦合系统次同步振荡特性的影响可知，制氢系统的投入使风氢耦合并网系统次同步振荡的发散速率以及振荡幅值减小，提高了耦合系统的阻尼，系统稳定性得到改善。

参考文献

- [1] 程启明, 周伟成, 程尹曼, 等. 基于线性自抗扰控制的双馈风机次同步振荡抑制研究[J]. 电力建设, 2024, 45(4): 134-146.
CHENG Q M, ZHOU W C, CHENG Y M, et al. Research on suppressing sub-synchronous oscillation of doubly-fed induction generator based on linear active disturbance rejection control[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 134-146.
- [2] 戴礼国, 杨浩, 陈力, 等. 基于深度强化学习的风电柔直并网系统次同步振荡抑制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 1-7.
DAI L G, YANG H, CHEN L, et al. Subsynchronous oscillation suppression method for flexible direct grid-connected wind power system based on deep reinforcement learning[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 1-7.
- [3] 张鑫宇, 薛峰, 李碧君, 等. 双馈风场串补系统次同步振荡紧急控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 108-116.
ZHANG X Y, XUE F, LI B J, et al. Emergency control strategy for subsynchronous oscillation of DFIG-based wind farms with a series-compensated line [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 108-116.
- [4] 陈永权, 方瑜. 多组合虚拟电厂中氢储能低碳经济配置与优化[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 107-118.
CHEN Y Q, FANG Y. Low carbon economic configuration and optimization of hydrogen storage in multi-portfolio virtual power plants[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 107-118.
- [5] 曹冬惠, 杜冬梅, 何青. 氢储能安全及其检测技术综述[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 431-442.
CAO D H, DU D M, HE Q. Summary of hydrogen energy storage safety and its detection technology[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 431-442.
- [6] 毕锐, 王孝淦, 袁华凯, 等. 考虑供需双侧响应和碳交易的氢能综合能源系统鲁棒调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 122-132.
BI R, WANG X G, YUAN H K, et al. Robust dispatch of a hydrogen integrated energy system considering double side response and carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 122-132.
- [7] 胡俊杰, 童宇轩, 刘雪涛, 等. 计及精细化氢能利用的综合能源系统多时间尺度鲁棒优化策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1419-1435.
HU J J, TONG Y X, LIU X T, et al. Multi-time-scale robust optimization strategy for integrated energy system considering the refinement of hydrogen energy use[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1419-1435.
- [8] 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 C, GUO C Y, LIU J Z, 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.
- [9] 尹梦雪, 刘辉, 李蕴红, 等. 风电-串补输电系统次同步谐振特性与风电机组数量及线路参数关系研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 174-179.

- YIN M X, LIU H, LI Y H, et al. Research on impact on sub-synchronous resonance risk from dfng number and grid structure in Guyuan area[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2021, 42(1): 174-179.
- [10] 董晓亮, 田旭, 张勇, 等. 沽源风电场串补输电系统次同步谐振典型事件及影响因素分析[J]. *高电压技术*, 2017, 43(1): 321-328.
- DONG X L, TIAN X, ZHANG Y, et al. Practical SSR incidence and influencing factor analysis of DFIG-based series-compensated transmission system in Guyuan farms[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(1): 321-328.
- [11] ZHU C, FAN L L, HU M Q. Control and analysis of DFIG-based wind turbines in a series compensated network for SSR damping[C]//Power & Energy Society General Meeting. Detroit, Michigan, USA: IEEE, 2010: 5590091.
- [12] XIE X, ZHANG X, LIU H, et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(3): 1117-1126.
- [13] GONZALEZ A, MCKEOGH E, GALLACHO B O. The role of hydrogen in high wind energy penetration electricity systems: the Irish case[J]. *Renewable Energy*, 2003, 29(4): 471-489.
- [14] 尹文良, 芮晓明, 武鑫. 1.5 MW 风电制氢系统建模分析与仿真研究[EB/OL]. (2016-05-23)[2024-02-12]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=92139c2d71f1dd3c10c559b99ded76fc&site=xueshu_se.
- YIN W L, RUI X M, WU X. Modeling analysis and simulation research of 1.5MW wind power hydrogen production system[EB/OL]. (2016-05-23) [2024-02-12]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=92139c2d71f1dd3c10c559b99ded76fc&site=xueshu_se.
- [15] 赵强, 张雅洁, 谢小荣, 等. 基于可再生能源制氢系统附加阻尼控制的电力系统次同步振荡抑制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(13): 3728-3735.
- ZHAO Q, ZHANG Y J, XIE X R, et al. Mitigation of subsynchronous oscillations based on renewable energy hydrogen production system and its supplementary damping control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(13): 3728-3735.
- [16] 马天辉, 马巍巍, 谷怀广, 等. 基于制氢协同阻尼控制技术的次同步振荡抑制研究[J]. *电气传动*, 2022, 52(8): 41-47.
- MAT H, MA W W, GU H G, et al. Research on the suppression of subsynchronous oscillation based on the coordinated damping control technology of hydrogen production[J]. *Electric Drive*, 2022, 52(8): 41-47.
- [17] 贾祺. 风电场等值建模及并网系统的次同步振荡特性研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- JIA Q. Equivalent modeling of wind farm and study on subsynchronous oscillation characteristics of grid-connected system[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2021.
- [18] 钱纹, 赵岳恒, 胡凯, 等. 双馈风电场并网次同步振荡分析与抑制方法研究[J]. *电气自动化*, 2021, 43(1): 41-44.
- QIAN W, ZHAO Y H, HU K, et al. Analysis of grid connection sub-synchronous oscillation and research of suppression method in doubly-fed wind farms[J]. *Electrical Automation*, 2021, 43(1): 41-44.
- [19] 董文凯, 王洋, 王海风. 用于小信号稳定性分析的风电机群单机等值模型[J]. *电网技术*, 2021, 45(4): 1241-1249.
- DONG W K, WANG Y, WANG H F. Single-machine equivalent model of a group of wind turbine generators for small-signal stability analysis[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(4): 1241-1249.
- [20] XIE X, WANG S, LIU H, et al. Hydrogen production equipment-based supplementary damping control to mitigate subsynchronous oscillation in wind power systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(14): 2715-2722.
- [21] 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 Q, SHEN Y. Development status of hydrogen energy storage system coupled wind power generation[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(8): 9-17.
- [22] PANITZ M, CHRISTOPOULOS C. Dynamic modelling of the electromagnetic behaviour of cavities with randomly positioned boundaries[C]//2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Cape Town, South Africa: IEEE, 2012: 182-185.
- [23] 王龙. 风电场并网系统的次同步振荡问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- WANG L. Study on subsynchronous oscillation of wind farm grid-connected system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [24] LU X, DU B, ZHOU S, et al. Optimization of power allocation for wind-hydrogen system multi-stack PEM water electrolyzer considering degradation

conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(15): 5850-5872.

- [25] 孔令国, 宫健, 杨士慧, 等. DC/DC 隔离型制氢电源发展现状与趋势[J]. 发电技术, 2023, 43(4): 443-451.

KONG L G, GONG J, YANG S H, et al. Development status and trend of DC/DC isolated hydrogen production power supply[J]. Power Generation Technology, 2023, 43(4): 443-451.

收稿日期: 2024-03-02。

修回日期: 2024-06-18。

作者简介:



鲁亚楠

鲁亚楠(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, lyn320162@163.com;



徐涛

徐涛(1968), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制, 本文通信作者, 13664780968@163.com;



刘泽楠

刘泽楠(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, 839268455@qq.com。

(责任编辑 辛培裕)