

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406169

考虑构网型储能换流器稳定边界的全阶小信号建模及频率支撑特性分析

杨健¹, 苏小玲¹, 陈来军^{1,2}, 赵正奎¹, 杨军³

(1.青海大学能源与电气工程学院新能源电力系统智慧运行教育部重点实验室, 青海 西宁 810016;
2.清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;
3.国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海 西宁 810001)

[摘要] 构网型储能是解决新能源大规模接入电网调频资源不足、抗扰能力下降等问题的关键。受其固有的功率耦合特性影响, 构网型换流器对系统的支撑能力受到极大限制, 参数设置不合理极易出现功率超调、振荡甚至失稳等问题。对此, 首先建立了构网型储能换流器并网系统全阶小信号模型, 根据输出功率状态空间模型及其特征根, 分析构网型储能换流器频率响应特性。在此基础上, 通过状态空间矩阵参数灵敏度及参与因子分析, 给出了构网型储能换流器稳定边界, 明确了构网型储能换流器关键参数对其动态功率耦合、频率支撑等涉网特性的影响。仿真和半实物实验结果验证了理论分析的正确性和可行性, 为构网型储能换流器并网参数设计及稳定运行提供了依据。

[关键词] 构网型储能; 系统支撑能力; 稳定边界; 全阶小信号建模; 频率响应特性

[引用本文格式] 杨健, 苏小玲, 陈来军, 等. 考虑构网型储能换流器稳定边界的全阶小信号建模及频率支撑特性分析[J]. 热力发电, 2025, 54(3): 1-11. YANG Jian, SU Xiaoling, CHEN Laijun, et al. Full-order small-signal modeling and frequency support characterization for grid-forming energy storage converter considering its stability boundary[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(3): 1-11.

Full-order small-signal modeling and frequency support characterization for grid-forming energy storage converter considering its stability boundary

YANG Jian¹, SU Xiaoling¹, CHEN Laijun^{1,2}, ZHAO Zhengkui¹, YANG Jun³

(1.Key Laboratory of Intelligent Operation of New Energy Power System of Ministry of Education, School of Energy and Electrical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;
2.Department of Electrical Engineering and Applied Electronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3.Electric Power Research Institute, State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810001, China)

Abstract: Grid-forming energy storage system is expected to solve the problems like insufficient frequency modulation resources and disturbance resistance decline of large-scale new energy-based power grid. However, its active support ability is greatly limited due to its inherent power coupling characteristics, plus power overshoot, oscillation and even instability problems are most likely to occur with parameter variation. To solve this problem, a full-order small signal model for grid-forming energy storage system is developed, its frequency response characteristics are analyzed according to the output power state space model and its characteristic roots. On this basis, by analyzing the sensitivity and participation factors of the state space matrix parameters, the stable boundary of the grid-forming energy storage converter is given, and the influence of key parameters of the grid-forming energy storage converter on its dynamic power coupling, frequency support and other grid related characteristics is clarified. The simulation and semi physical experimental results have verified the correctness and feasibility of the theoretical analysis, providing a basis for the design of grid connected parameters and stable operation of grid-forming energy storage converters.

收稿日期: 2024-06-19 网络首发日期: 2024-12-16

基金项目: 青海省基础研究计划项目(2022-ZJ-935Q); 国家自然科学基金项目(52167022)

Supported by: Natural Science Foundation of Qinghai Province (2022-ZJ-935Q); National Natural Science Foundation of China (52167022)

第一作者简介: 杨健(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为构网型换流器并网稳定性分析, 1834669696@qq.com.

通信作者简介: 苏小玲(1986), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电并网稳定性分析及控制, suxiaoling@qhu.edu.cn.

Key words: grid-forming energy storage; system support capability; stable boundary; full-order small-signal modeling; frequency response characteristics

以电力电子设备为接口的风光新能源大规模并网,降低了网内同步发电机类电源占比,而电网带来了惯性下降、抗扰动能力弱等技术挑战,电网面临频率失稳的可能性。因此,新时代下可再生能源发电的接入规模将影响我国电力系统稳定性,需要对新时代背景下的电力系统稳定性进行研究,确保电网安全运行^[1-2]。

新能源发电通常以跟网型换流器接入电网^[3-5],而这种基于锁相环的控制策略对电网的频率支撑不足,且受锁相环带宽限制,跟网型换流器在电网扰动情况下的稳定能力将进一步弱化^[6-7],导致新能源大规模并网,电网可调节资源存量下降,抵御频率扰动的能力减弱。构网型储能换流器具有频率支撑能力,可改善跟网型换流器频率响应问题^[8-10],它具有与同步发电机类似的输出特性,可描述为电压源。同步发电机电枢电阻高,可以在强电网中保持自身较大的连接阻抗,不存在 2 个电压源直接并联导致的振荡风险^[11-12]。与同步发电机相比,构网型储能换流器的运行特性主要由虚拟惯量,虚拟阻尼等参数决定,没有具体的物理限制,参数选取灵活性高^[13-15]。

然而,在网侧频率扰动的情况下,构网型储能换流器对动态参数的频率响应特性是增加其振荡风险的主要诱因。构网型储能换流器等值电感动态变化也将进一步增加稳定分析的难度。文献[16-17]采用状态空间法建立了构网/跟网型换流器微电网模型,结果表明,构网型换流器虚拟阻尼增加,特征根则向复平面左侧变化,说明在合理范围内增大虚拟阻尼可提高其稳定性。但该模型仅适用于孤岛微电网,构网型储能换流器接入大电网,受电网运行状态的影响,很难在变工况下始终保持优越的稳定性。为分析构网型换流器并网振荡风险,文献[18-19]建立了构网型换流器阻抗模型,提出增减惯量均会影响对应频段的阻抗,且惯量越小,构网型换流器的负阻抗特性越明显。

针对构网型储能换流器的理论研究,目前主要从构网型控制建模^[20-21]、构网型换流器小信号稳定性分析、储能优化配置,以及参数优化等方向^[22-24]进行。在频率支撑特性研究中,构网型储能换流器的虚拟惯量与虚拟阻尼定为重点研究参数,文献[25]在虚拟惯量控制中加入暂态阻尼与稳态阻尼控制来改善暂态过程带来的影响,但仅考虑构网型

控制环,未从全阶建模进行分析;文献[26]建立了基于构网型控制的三机九节点的电力系统模型,通过惯量延迟控制达到了优化效果,但分析模型并未考虑到滤波和线路参数的影响。文献[27]提出一种储能协调的自适应构网型控制策略,能够控制虚拟惯量与虚拟阻尼调节系统频率,但系统模型也是仅考虑构网型控制外环,忽略了滤波线路参数的影响。此外,构网型换流器虚拟惯量和阻尼系数与其频率支撑特性强相关,而目前构网型换流器等值模型、稳定性分析中弱化了线路模块、电压电流双环控制模块的影响,很难准确描述构网型换流器频率响应特性。

为研究电网频率变化工况下,构网型储能换流器虚拟惯量、虚拟阻尼对其频率支撑特性及稳定能力的影响,本文首先根据构网型储能换流主电路结合构网型控制及主要参数建立了构网型储能换流器全阶小信号模型;然后,采用特征根法分析了构网型储能换流器在电网频率扰动下对系统频率支撑特性的影响,得出构网型储能换流器有功控制环稳定边界;最后,建立了时域仿真模型验证理论研究结果,并通过 StarSim HIL 平台完成了实验验证。

1 构网型储能换流器结构

构网型储能换流器并网结构如图 1 所示,控制系统包括坐标变换、功率计算、构网控制和电压电流跟踪等模块。

将构网型控制器输出参考电压作为换流器的端口电压,由图 1 可得构网型储能换流器侧滤波电路在 dq 坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_f}(-R_f i_d + \omega L_f i_q + u_d - u_{od}) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_f}(-R_f i_q - \omega L_f i_d + u_q - u_{oq}) \\ \frac{du_{od}}{dt} = \frac{1}{C_f}(\omega C_f u_{oq} + i_d - i_{od}) \\ \frac{du_{oq}}{dt} = \frac{1}{C_f}(-\omega C_f u_{od} + i_q - i_{oq}) \\ \frac{di_{od}}{dt} = \frac{1}{L_c}(\omega L_c i_{oq} + u_{od} - u_{gd} - R_c i_{od}) \\ \frac{di_{oq}}{dt} = \frac{1}{L_c}(-\omega L_c i_{od} + u_{oq} - u_{gq} - R_c i_{oq}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： i_d 、 i_q 为储能换流器输出电流 dq 坐标分量； i_{od} 、 i_{oq} 为线路电感 L_c 的电流 dq 坐标分量； u_d 、 u_q 为构网型储能换流器输出电压 dq 坐标分量； u_{od} 、 u_{oq} 为储能换流器交流侧滤波器电容电压 dq 坐标分量； u_{gd} 、 u_{gq} 为储能换流器交流侧电网电压 dq 坐标分量。设 Δ 为线性化微小变量，式(1)可整理为：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_{dq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_f \begin{bmatrix} \Delta i_{dq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_f \begin{bmatrix} \Delta u_{dq} \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中：

$$\mathbf{A}_f = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega_0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega_0 & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega_0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & 0 & -\frac{R_c}{L_c} & \omega_0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & -\omega_0 & -\frac{R_c}{L_c} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_f = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 & I_q \\ 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & -I_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & U_{oq} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -U_{od} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_c} & 0 & I_{oq} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_c} & -I_{od} \end{bmatrix}$$

电网具有一定的抗干扰能力，在小干扰情况下电网电压幅值 E_g 与电网角频率 ω_g 保持不变。以构网型换流器为参考坐标系，将电网侧小信号模型变换到同一旋转坐标系内，即：

$$\begin{cases} \Delta u_{gd} = E_g \cos \delta_{g0} \Delta \delta_g \\ \Delta u_{gq} = -E_g \sin \delta_{g0} \Delta \delta_g \\ \Delta \dot{\delta}_g = -\Delta \omega \end{cases} \quad (3)$$

式中， δ_g 为交流电网电压与参考坐标系 d 轴的相位差。

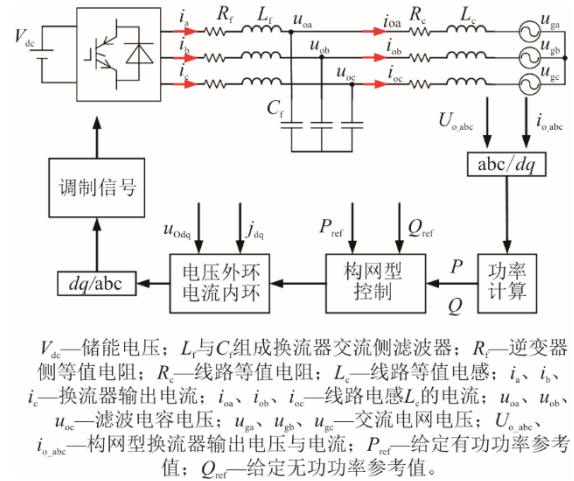


图1 构网型并网系统控制框图
Fig.1 Control block diagram of grid-connected system

2 构网型储能换流器控制系统

2.1 构网型功率控制

输出功率可根据构网型储能换流器交流侧滤波器电容电压 u_{od} 、 u_{oq} 与线路电感 L_c 的电流 i_{od} 、 i_{oq} 计算，对应小信号模型为：

$$\begin{cases} \Delta P = 1.5(I_{od} \Delta u_{od} + I_{oq} \Delta u_{oq} + U_{od} \Delta i_{od} + U_{oq} \Delta i_{oq}) \\ \Delta Q = 1.5(I_{od} \Delta u_{oq} - I_{oq} \Delta u_{od} + U_{oq} \Delta i_{od} - U_{od} \Delta i_{oq}) \end{cases} \quad (4)$$

构网型储能换流器功率控制如图2所示，包括有功功率控制与无功功率控制模块。

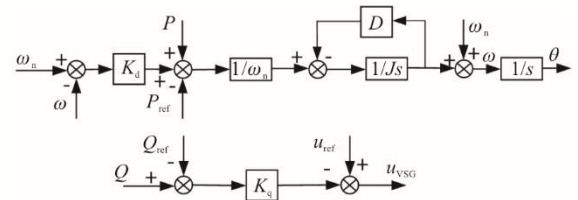


图2 构网型功率控制框图
Fig.2 Block diagram of grid-forming power control

根据图2，得到构网型功率控制模块的状态方程为：

$$\begin{cases} J \frac{d(\omega - \omega_n)}{dt} = \frac{P - P_{ref} + K_d(\omega_n - \omega)}{\omega_n} + D(\omega_n - \omega) \\ u_{VSG_d} = u_{ref} - K_q(Q - Q_{ref}) \end{cases} \quad (5)$$

在电网小扰动情况下，将式(5)在 dq 旋转坐标系下线性化，可得构网型换流器小信号状态空间模型为：

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{K_d + D\omega_n}{J\omega_n}\Delta\omega - \frac{1}{J\omega_n}\Delta P \\ \Delta u_{VSG,d} = -K_q\Delta Q \end{cases} \quad (6)$$

2.2 电压电流控制环

电压电流双环控制响应速度快、稳定可靠，内外环间的协同作用能够实现精准控制，与构网型控制配合能够提高构网型换流器运行可靠性。构网型储能换流器电压电流跟踪模块结构如图3所示。

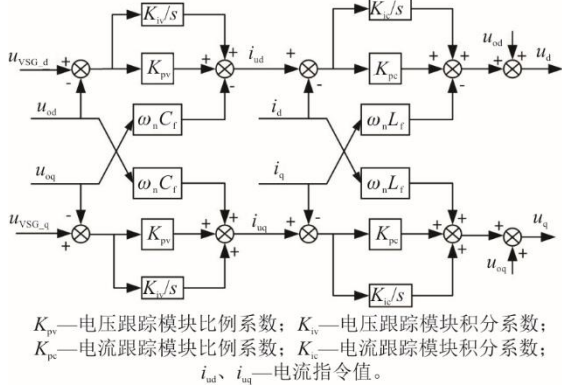


图3 电压电流双环控制框图

Fig.3 Block diagram of voltage and current double-loop control

由图3可得电流指令值 i_{ud} 、 i_{uq} 和电压指令值 u_d 、 u_q 的关系为:

$$\begin{cases} i_{ud} = -\omega_n C_f u_{oq} + K_{pv} (u_{VSG,d} - u_{od}) + K_{iv} x_{ud} \\ i_{uq} = \omega_n C_f u_{od} + K_{pv} (u_{VSG,q} - u_{oq}) + K_{iv} x_{uq} \\ u_d = u_{od} - \omega_n L_f i_q + K_{pc} (i_{ud} - i_d) + K_{ic} x_{id} \\ u_q = u_{oq} + \omega_n L_f i_d + K_{pc} (i_{uq} - i_q) + K_{ic} x_{iq} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)对应的小信号状态空间模型为:

$$\begin{cases} \Delta i_{ud} = K_{iv} \Delta x_{ud} + K_{pv} \Delta u_{VSG,d} - K_{pv} \Delta u_{od} - \omega_n C_f \Delta u_{oq} \\ \Delta i_{uq} = K_{iv} \Delta x_{uq} + K_{pv} \Delta u_{VSG,q} - K_{pv} \Delta u_{oq} + \omega_n C_f \Delta u_{od} \\ \Delta u_d = K_{ic} \Delta x_{id} + K_{pc} \Delta i_{ud} - K_{pc} \Delta i_d - \omega_n L_f \Delta i_q + \Delta u_{od} \\ \Delta u_q = K_{ic} \Delta x_{iq} + K_{pc} \Delta i_{uq} - K_{pc} \Delta i_q + \omega_n L_f \Delta i_d + \Delta u_{oq} \end{cases} \quad (8)$$

将变量 x_{ud} 、 x_{uq} 和 x_{id} 、 x_{iq} 分别定义为电压电流跟踪模块的中间状态变量，结合式(1)、式(6)与式(8)可得电压电流跟踪模块状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{dx_{ud}}{dt} = u_{VSG,d} - u_{od} \\ \frac{dx_{uq}}{dt} = u_{VSG,q} - u_{oq} \\ \frac{dx_{id}}{dt} = i_{ud} - i_d \\ \frac{dx_{iq}}{dt} = i_{uq} - i_q \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)线性化，得到小信号模型为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta x_{udq} \\ \Delta x_{idq} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1 \begin{bmatrix} \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{dq} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_1 \begin{bmatrix} \Delta i_{dq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{其中: } \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & K_{pc} K_{iv} \\ K_{pc} K_{iv} & 0 \\ 0 & K_{ic} \\ K_{ic} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \omega_n L_f & -K_{pc} \\ -K_{pc} & -\omega_n L_f \\ K_{pc} \omega_n C_f & 1 + 1.5 K_{pc} K_{pv} K_q I_{oq} - K_{pc} K_{pv} \\ -K_{pc} K_{pv} & -1.5 K_{pc} K_{pv} K_q I_{od} - K_{pc} \omega_n C_f \\ 0 & -1.5 K_{pc} K_{pv} K_q U_{oq} \\ 0 & 1.5 K_{pc} K_{pv} K_q U_{od} \end{bmatrix}^T.$$

3 构网型储能换流器稳定性分析

整理构网型储能换流器主电路、控制模块小信号模型，建立构网型储能换流器全阶小信号模型，如式(11)所示:

$$\Delta \dot{x} = \mathbf{A} \Delta x \quad (11)$$

式中: \mathbf{A} 为构网型储能换流器并网系统的状态矩阵, $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_{z1} \mathbf{A}_{z2} \mathbf{A}_{z3} \mathbf{A}_{z4}]$; $\Delta x = [\Delta x_1, \Delta \delta_g]^T$ 为系统状态变量, $\Delta x_1 = [\Delta \omega, \Delta i_{dq}, \Delta u_{odq}, \Delta i_{odq}, \Delta x_{udq}, \Delta x_{idq}]^T$ 。其中:

$$\mathbf{A}_{z1} = \begin{bmatrix} \frac{-K_d - D\omega_n}{J\omega_n} & 0 & 0 \\ I_q & \frac{-K_{pc} - R_f}{L_f} & \omega_0 - \omega_n \\ -I_d & \omega_n - \omega_0 & \frac{-K_{pc} - R_f}{L_f} \\ U_{oq} & \frac{1}{C_f} & 0 \\ -U_{od} & 0 & \frac{1}{C_f} \\ I_{oq} & 0 & 0 \\ -I_{od} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{z2} = \begin{bmatrix} \frac{-1.5I_{od}}{J\omega_n} & \frac{-1.5I_{oq}}{J\omega_n} \\ 1.5K_{pc}K_{pv}K_qI_{oq} & -1.5K_{pc}K_{pv}K_qI_{od} \\ -K_{pc}K_{pv} & -K_{pc}\omega_n C_f \\ \frac{L_f}{K_{pc}\omega_n C_f} & \frac{L_f}{-K_{pc}K_{pv}-1} \\ L_f & L_f \\ 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_c} \\ 0 & \frac{1}{L_c} \\ 1.5K_qI_{oq}-1 & -1.5K_qI_{od} \\ 0 & -1 \\ 1.5K_{pv}K_qI_{oq}-K_{pv} & -1.5K_{pv}K_qI_{od}-\omega_n C_f \\ \omega_n C_f & -K_{pv} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

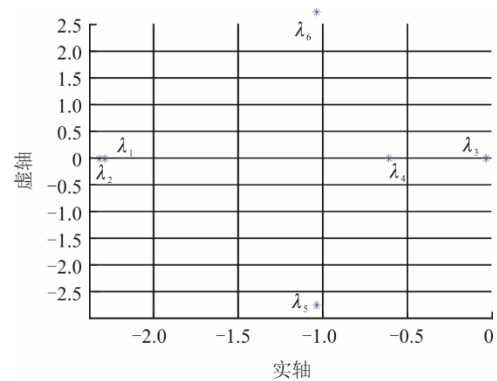
$$A_{z3} = \begin{bmatrix} \frac{-1.5U_{od}}{J\omega_n} & \frac{-1.5U_{oq}}{J\omega_n} & 0 \\ -1.5K_{pc}K_{pv}K_qU_{oq} & -1.5K_{pc}K_{pv}K_qU_{od} & K_{pc}K_{iv} \\ L_f & L_f & L_f \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{C_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{C_f} & 0 \\ \frac{-R_c}{L_c} & \omega_0 & 0 \\ -\omega_0 & \frac{-R_c}{L_c} & 0 \\ -1.5K_qU_{oq} & -1.5K_qU_{od} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1.5K_{pv}K_qU_{oq} & 1.5K_{pv}K_qU_{od} & K_{iv} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{z4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{iv}}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{K_{pc}K_{iv}}{L_f} & 0 & \frac{K_{ic}}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -E_g \cos \delta_g \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L_c}{-E_g \sin \delta_g} \\ 0 & 0 & 0 & L_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{iv} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

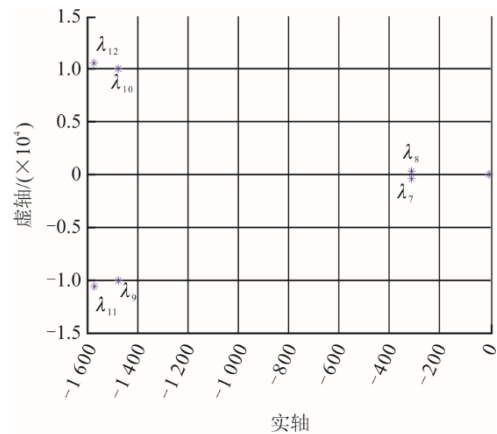
型及表 1 参数, 可计算出系统的全部特征根, 见图 4 与表 2。在此基础上, 可确定其主导特征根并根据主导特征根的变化趋势确定构网型储能换流器并网系统稳定性, 以及在该稳态运行点处参数变化对系统小信号稳定性及动态特性的影响。

表 1 构网型储能换流器全阶小信号模型参数
Tab.1 Parameters of full-order small signal model for grid-forming energy storage converter

项目	数值	项目	数值	项目	数值
R_f/Ω	0.05	R_c/Ω	0.05	I_q/A	3.9
L_f/mH	3	L_c/mH	3	I_{od}/A	147.6
$C_f/\mu F$	35	P_{ref}/kW	80	I_{oq}/A	-0.03
Q_{ref}/var	0	K_d	30	U_{od}/V	362.4
$J/(kg \cdot m^2)$	4	K_q	0.000 1	U_{oq}/V	0
$D/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	100	I_d/A	147.6	$\omega_0/(rad \cdot s^{-1})$	314.3
K_{pv}	6	K_{iv}	153	K_{pc}	0.323
K_{ic}	4.2				



a) 特征根 λ_{1-6} 分布情况



b) 特征根 λ_{7-12} 分布情况

图 4 特征根分布

Fig.4 Feature root distribution

为进一步分析不同模块对构网型储能换流器的影响程度, 根据式(11)构建的构网型储能换流器全阶小信号模型进行参与因子分析, 由构网型储能

根据式(11)的构网型储能换流器全阶小信号模

换流器状态矩阵 A 可计算状态矩阵的右特征向量 v_i 与左特征向量 u_i^T , 右特征向量体现了状态变量对模式的“客观性”, 左特征向量体现了状态变量对模式的“可控性”, 将左特征向量与右特征向量相乘即可得到第 k 个状态变量 x_k 与第 i 个模式 λ_i 的参与因子, 即^[28]:

$$P_{ki} = u_{ki}v_{ki} \quad (12)$$

表 2 构网型储能换流器全阶小信号模型参数特征根
Tab.2 Characteristic roots of full-order small signal model for grid-forming energy storage converter

特征根	实部	虚部	振荡频率/Hz	阻尼比	主要相关状态变量
λ_1	-2.288	0	0	1	i_d, u_{oq}, i_{od}
λ_2	-2.317	0	0	1	u_{od}, x_{iq}
λ_3	-0.607	0	0	1	i_d, i_q, u_{od}
λ_4	-0.009	0	0	1	i_d, i_q, u_{od}
λ_{5-6}	-1.035	± 2.728	4.285	0.355	ω, i_d
λ_{7-8}	-309.854	± 299.453	470.380	0.719	i_d, x_{uq}
λ_{9-10}	-1 478.410	$\pm 10 025.651$	15 748.256	0.146	i_d, i_q, u_{od}, x_{ud}
λ_{11-12}	-1 576.007	$\pm 10 592.447$	16 638.577	0.147	$i_d, u_{od}, i_{oq}, x_{id}$

式中: u_{ki} 为左特征向量 u_i^T 中第 k 个元素, 表示状态变量 x_k 对模式 i 的影响程度; v_{ki} 为右特征向量 v_i 中第 k 个元素, 表示状态变量 x_k 对模式 i 的活动状况。

图 5 为构网型储能换流器参与因子。图中 ω 与 i_d 状态变量的参与因子为正, 表示在构网型储能换流器全阶小信号模型中构网型有功控制环与线路参数对整个系统的影响程度较高, 其他参与因子为 0 甚至为负值, 对整个系统的稳定影响不大。对比状态变量 ω 与 i_d 的参与因子, 可以看出 ω 的参与因子远远大于 i_d , 所以构网型储能换流器的稳定性取决于构网型有功控制环。

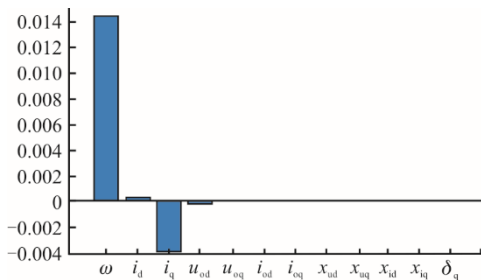
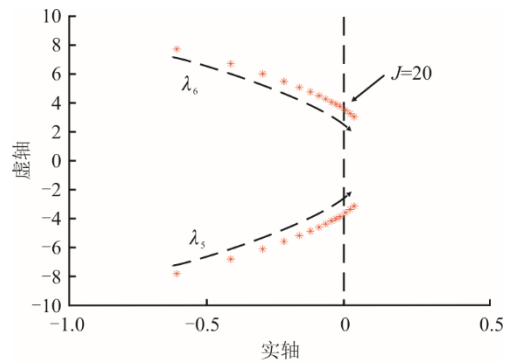


图 5 构网型储能换流器参与因子
Fig.5 Participation factor of grid-forming energy storage converter

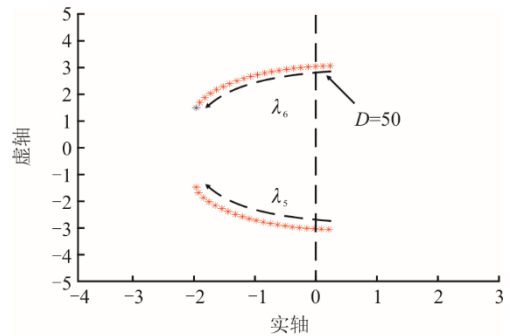
构网型换流器有功功率控制环中的虚拟惯量与虚拟阻尼系数可灵活调节, 且直接影响系统稳定状态。若虚拟惯量不变, 增大虚拟阻尼可减小系统的超调量、增加稳定时间。若虚拟阻尼保持不变,

增大虚拟惯量则会增加系统振荡风险。需要明确稳定边界, 保证构网型储能换流器的控制性能。

由表 2 可知, 系统共有 12 个特征根, 对应 4 个振荡模式。在所有特征根中, 因为特征根 λ_{7-12} 距虚轴距离最远, 所以可以忽略其对稳定性的影响。特征根 λ_{5-6} 的振荡频率较低, 最靠近虚轴且为振荡衰减模态, 是系统主导特征根, 对稳定性影响较大。据前文分析可知, 影响构网型储能换流器稳定性的主要因素在于构网型有功控制环。虚拟转动惯量 J 、虚拟阻尼系数 D 及特征根 λ_{5-6} 的变化趋势如图 6 所示。



a) 虚拟惯量 J 下的根轨迹



b) 虚拟阻尼 D 下的根轨迹

图 6 不同虚拟惯量虚拟阻尼参数的根轨迹

Fig.6 Root trajectories of virtual damping parameters with different virtual inertias

若虚拟转动惯量 $J=4 \rightarrow 20$ 变化过程中其他参数保持不变, 对特征根 λ_{5-6} 的影响如图 6a) 所示, 图中箭头方向表示特征根 λ_{5-6} 随虚拟转动惯量 J 增大的稳定趋势。由图 6a) 可得, 随着虚拟转动惯量 J 的增大, 特征根 λ_{5-6} 向复平面右侧靠近虚轴的方向移动, 振荡频率略有减小。在电网扰动的情况下, J 的增大会导致构网型储能换流器频率与输出功率振荡。

在虚拟阻尼系数 $D=50 \rightarrow 100$ 变化过程中, 对振荡衰减模态特征根 λ_{5-6} 的影响如图 6b) 所示。由图 6b) 可知, 随着虚拟阻尼系数 D 增加, 特征根 λ_{5-6} 向复平面左侧远离虚轴的方向移动, 并且远离虚轴

的运动速度远大于远离实轴的运动速度，对应的振荡衰减模态的阻尼比增大，超调量将逐渐减小，振荡频率也略有下降。同理，虚拟阻尼系数 D 较小，在电网扰动情况下构网型储能换流器频率出现振荡甚至失稳。

基于构网型控制环虚拟惯量 J 与虚拟阻尼 D 的根轨迹，图 7 给出了相应 J 与 D 的构网型储能换流器稳定边界。

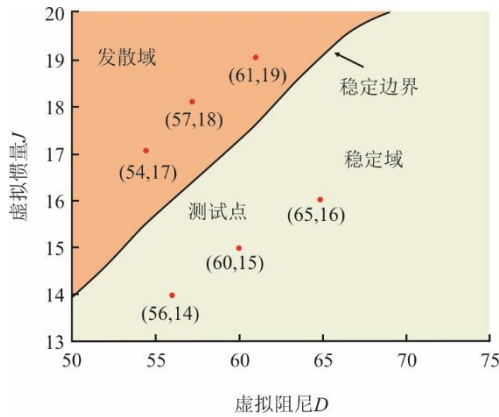


图 7 构网型控制环稳定边界

Fig.7 Stable boundary of the reticulated control ring

由图 7 可以看出：初始 $D=68$ 时，构网型储能换流器 J 低于 20 时即可保持稳定；当 $D=50$ 即保证构网型储能换流器虚拟阻尼最小运行时，需要保证系统虚拟惯量 J 减小到 14 以下才能保持稳定。

4 仿真分析

基于 MATLAB/Simulink 平台搭建构网型储能换流器仿真模型，如图 8 所示。仿真模型由主电路、坐标变换模块、构网型控制模块与电压电流双环控制模块组成，设虚拟转动惯量 $J=4$ 、虚拟阻尼系数 $D=100$ ，仿真时长设为 5 s。

若负荷突增 0.03 MW，电网频率降低，此时构网型换流器的额定功率为 0.08 MW，额定电压为 380 V。电网频率下降，构网型储能换流器将增发有功功率支撑电网频率。在此过程中，储能换流器的稳定性及其频率支撑能力主要由虚拟惯量系数 J 和虚拟阻尼系数 D 决定。

2 s 时刻电网频率降低 0.2 Hz，3 s 时刻电网频率恢复到 50 Hz，仿真结果如图 9 所示。构网型储能换流器稳定运行，因 2 s 时刻电网频率下降，构网型储能换流器输出有功功率增加以支撑电网，在此过程中，换流器电流升高，电压始终保持稳定。3 s 时刻电网频率恢复，构网型储能换流器输出有功功率从 0.12 MW 降低到 0.08 MW，在此过程中，换流器电流减小，电压始终保持稳定。

增大虚拟转动惯量 $J=20$ ，构网型储能换流器仿真波形图 10 所示，频率在 2.8 s 到达最低值 49.75 Hz，换流器有功功率虽然增加，但出现了振荡。与图 10a)、图 10b)相比，换流器具备支撑能力，但是由于 J 增大，换流器的抗扰动能力下降。

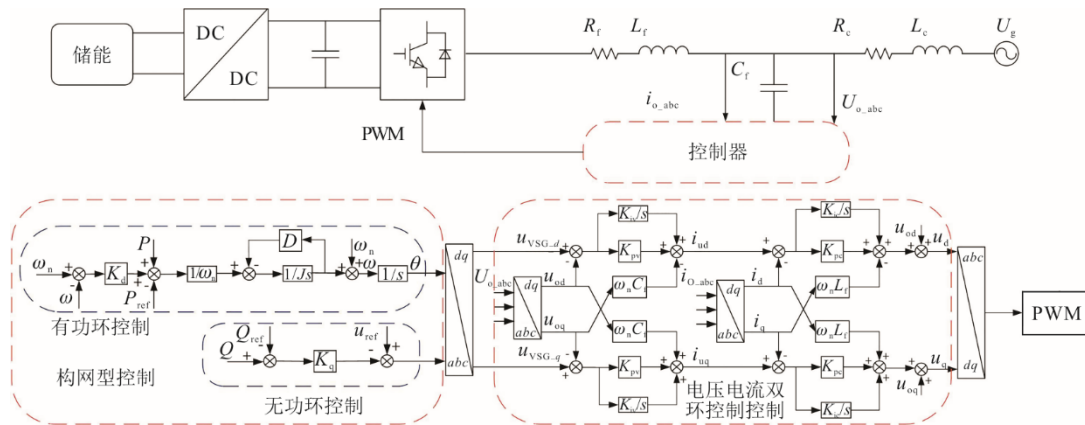
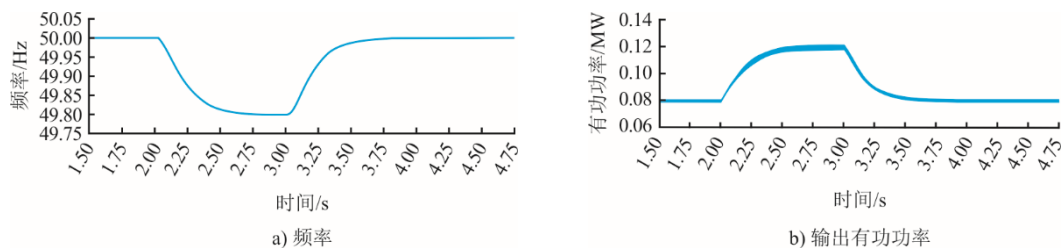


图 8 仿真模型

Fig.8 Simulation model



a) 频率

b) 输出有功功率

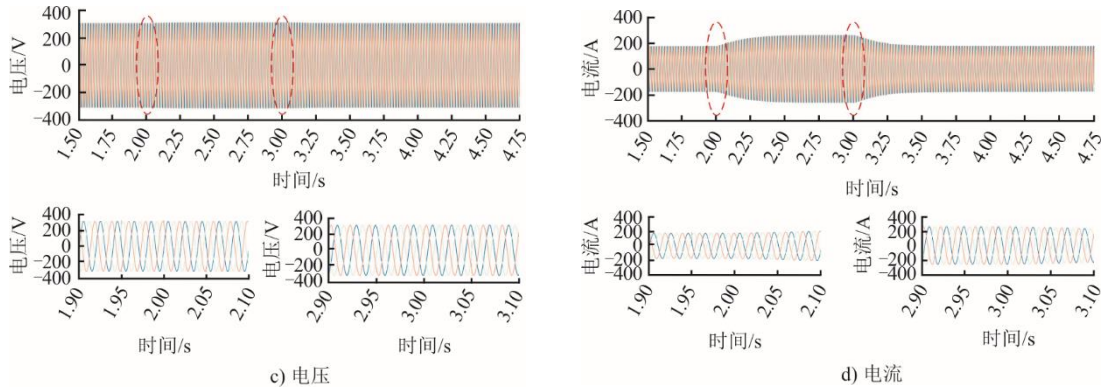
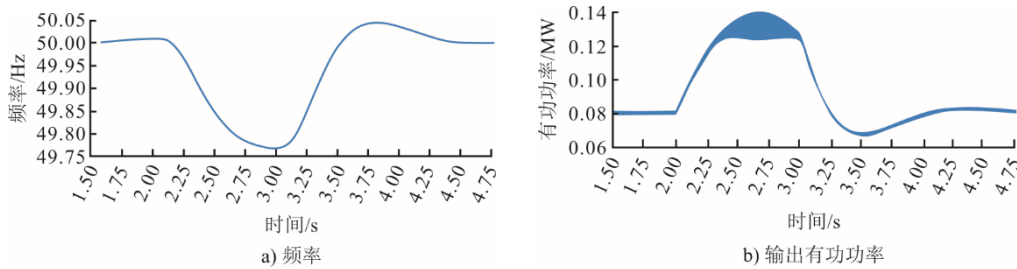


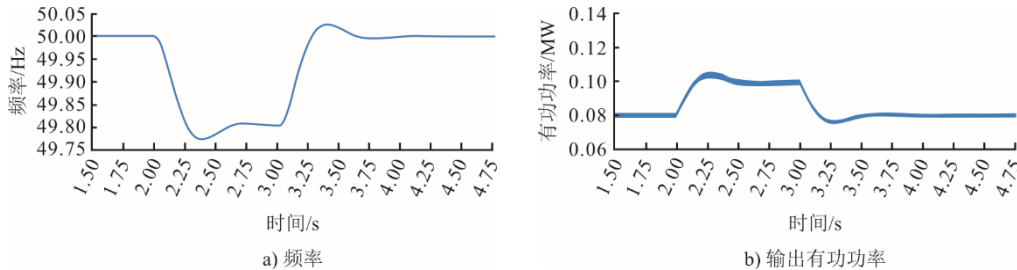
图 9 构网型储能换流器仿真波形

Fig.9 Simulation waveforms of grid-forming energy storage converter

图 10 $J=20$ 时构网型储能换流器仿真波形Fig.10 Simulation waveforms of grid-forming energy storage converter when $J=20$

减小虚拟阻尼系数至 $D=50$ ，构网型储能换流器仿真波形如图 11 所示。由图 11 可以看出，电网频率在 2.3 s 下降至 49.73 Hz，3.4 s 时达到 50.03 Hz。

与图 9b)相比，由于虚拟阻尼系数 D 减小，衰减振荡时间增加，而构网型换流器输出功率仅可增加到 0.1 MW。

图 11 $D=50$ 时构网型储能换流器仿真波形Fig.11 Simulation waveforms of grid-forming energy storage converter when $D=50$

构网型储能换流器并网等效电感的存在会叠加负阻尼力矩，导致阻尼比减小。如果负阻尼的绝对值大于虚拟阻尼系数 D ，构网型换流器就会出现振荡、支撑能力不足等问题。

5 实验验证

基于图 12 所示的 StarSim MT6020 和 NI PXIe-1071 平台搭建构网型储能换流器稳定性分析实验模型，模型由 StarSim MT6020 仿真器、NI PXIe-1071 控制器、交换机等组成。

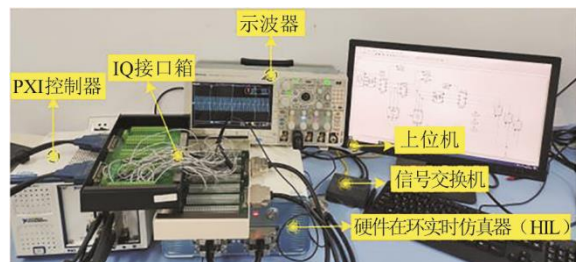


图 12 StarSim HIL 实验平台

Fig.12 StarSim HIL experimental platform

首先，通过实验验证构网型换流器的稳定

性 ($J=4$ 、 $D=100$)；其次，增大虚拟惯量 ($J=20$ 、 $D=100$)，验证电网扰动情况下构网型储能换流器的稳定性；最后，减小虚拟阻尼系数 ($J=4$ 、 $D=50$)，验证电网扰动情况下构网型储能换流器的稳定性；电网扰动为频率下降 0.2 Hz。

图 13 为 $J=4$ 、 $D=100$ 情况下构网型储能换流器实验波形。由图 13 可以看出，2.30 s 时刻电网频率下降 0.2 Hz，4.60 s 时刻电网频率恢复至 50 Hz。构网型储能换流器有功功率增加至 0.12 MW，以支撑电网频率，在此过程中，换流器电流升高，电压始终保持稳定。实验结果与仿真结果一致。

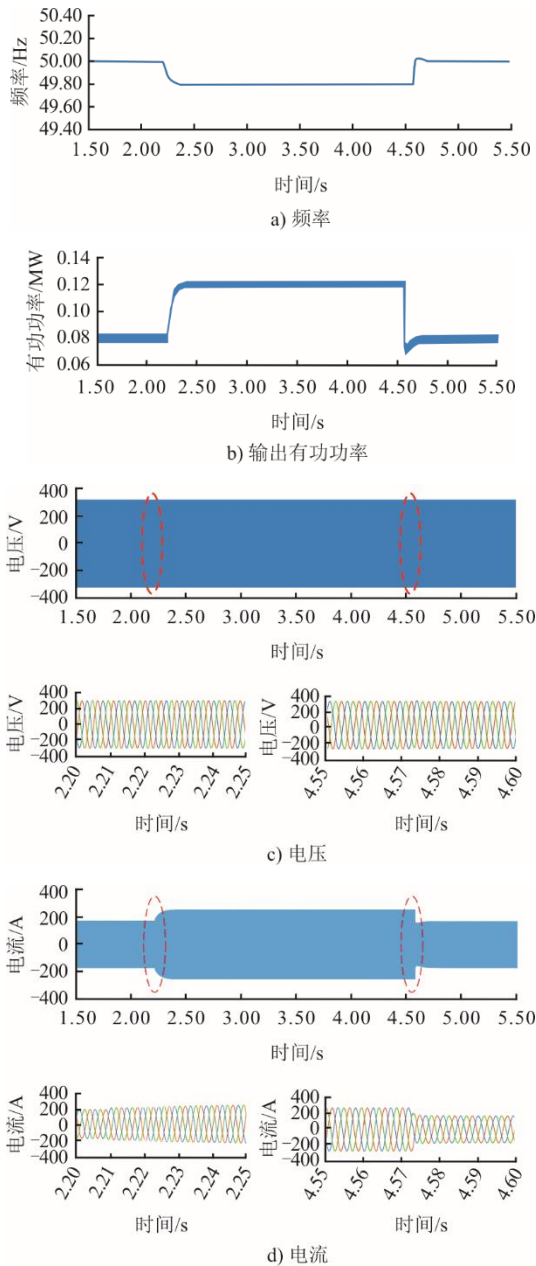


图 13 $J=4$ 、 $D=100$ 情况下构网型储能换流器实验波形
Fig.13 Simulation waveforms of grid-forming energy storage converter when $J=4$ and $D=100$

设定 $J=20$ 、 $D=100$ ，实验结果如图 14 所示。与图 13a)、图 13b)相比，频率低于 49.80 Hz，且在 2.50 s 时刻与输出功率同时出现了振荡。4.5 s 时刻电网频率恢复至 50.00 Hz，但构网型储能换流器在 5.00 s 后才能达到稳定状态，验证了理论与仿真分析结果：虚拟惯量增大会增加构网型储能换流器的振荡风险。

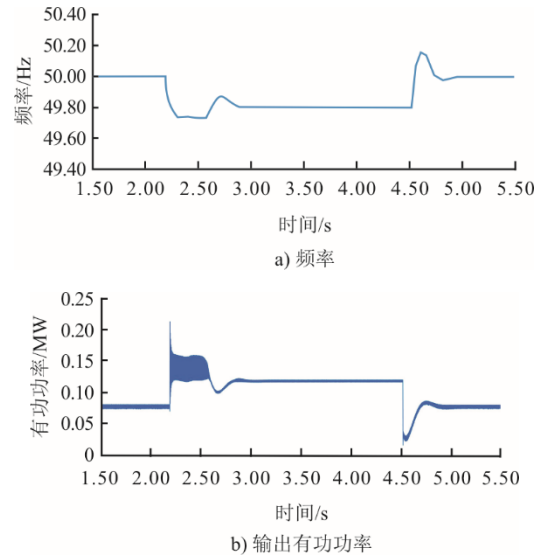
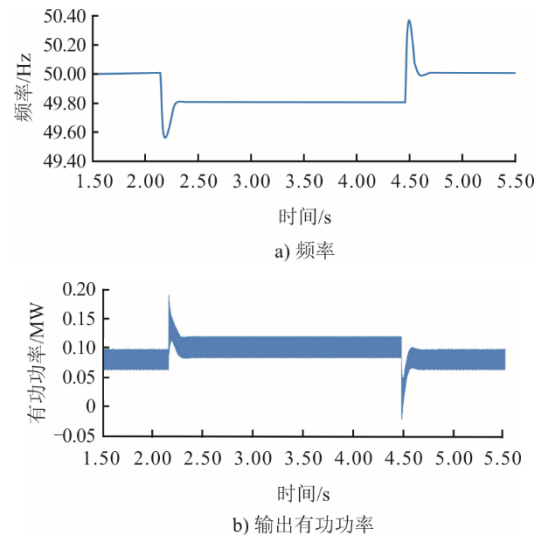


图 14 $J=20$ 时构网型储能换流器实验波形
Fig.14 Simulation waveforms of grid-forming energy storage converter when $J=20$

$J=4$ 、 $D=50$ 情况下的实验结果如图 15 所示。构网型储能换流器虚拟阻尼减小，造成负阻尼绝对值大于虚拟阻尼 D ，导致构网型储能换流器输出电压与输出电流畸变，有功功率始终有振荡，且对电网的支撑减弱。频率最低值为 49.57 Hz，远低于图 13 的实验结果；频率最高值达 50.40 Hz，也高于图 13 的实验结果。



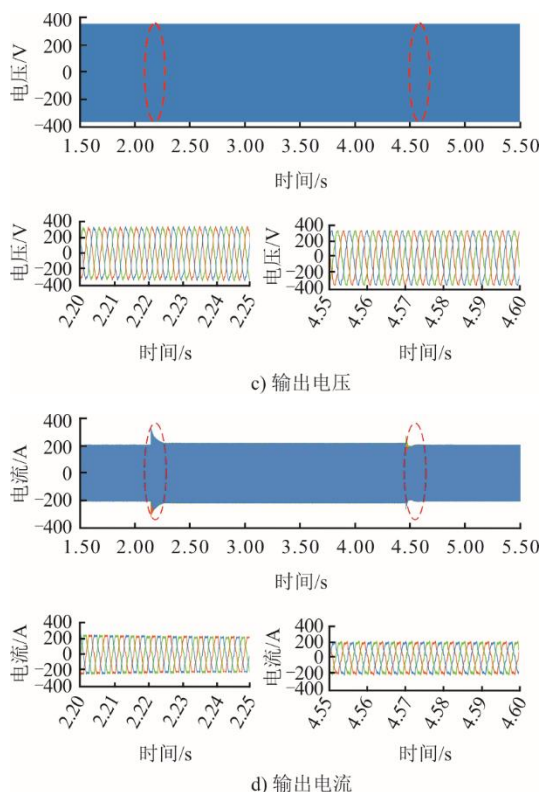


图 15 $D=50$ 时构网型储能换流器实验波形
Fig.15 Simulation results of grid-forming energy storage converter when $D=50$

6 结 论

考虑构网型储能换流器典型并网拓扑结构和功率、电压/电流各控制环节,建立了构网型储能换流器全阶小信号模型。通过特征根分析了影响并网系统稳定的主要控制参数,并基于关键影响参数及参与因子对特征根的影响进一步给出了构网型储能换流器稳定边界,明确了在电网侧用电负荷扰动工况下构网型储能换流器参数对系统频率支撑特性的影响。得出以下结论:

1) 由于构网型储能换流器并网电感的存在,随构网型储能换流器虚拟惯量的增加,其抗扰动能力下降;虚拟阻尼减小会使构网型储能换流器叠加负阻尼力矩,导致阻尼比减小,构网型储能换流器的稳定性变差,甚至面临振荡失稳问题。

2) 在发电功率小于用电负荷、电网出现频率降低情况下:初始 $D=68$ 时,构网型储能换流器 J 低于 20 时即可保持稳定;当 $D=50$ 即保证构网型储能换流器虚拟阻尼最小运行时,需要保证系统虚拟惯量 J 减小到 14 以下才能保持稳定。

3) 虚拟惯量 J 增大将导致频率降低变化量更大,并伴随换流器有功功率发生衰减振荡。而虚拟

阻尼 D 减小则会造成构网型储能换流器输出功率变化量减小,支撑能力不足,振荡时间变长。

4) 仿真和半实物实验结果与理论分析一致,验证了理论分析给出的稳定边界条件,为构网型储能换流器并网参数的设计及稳定运行提供了依据。

5) 随着以电力电子设备为接口的储能、新能源发电渗透率的不断增长,电力系统的等效调节资源持续下降,构网型换流器在支撑电网运行的同时必然面临与跟网型换流协同运行的场景,因此,下一步研究工作将重点关注跟网型换流器与构网型换流器的交互作用。

[参考文献]

- [1] 周勤勇,赵珊珊,刘增训,等.高比例新能源电力系统稳定拐点释义[J].电网技术,2020,44(8):2979-2986. ZHOU Qingyong, ZHAO Shanshan, LIU Zengxun, et al. Discussion on inflection point for power system stability with high proportion of new energy generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2979-2986.
- [2] NIKOS H, JOVICA M, CLAUDIA R, et al. Definition and classification of power system stability revisited & extended[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3271-3281.
- [3] BOUZID A M, GUERRERO J M, CHERITI A, et al. A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 751-766.
- [4] 詹长江,吴恒,王雄飞,等.构网型变流器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(6):2339-2359. ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [5] 耿华,何长军,刘浴霜,等.新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J].高电压技术,2022,48(9):3367-3383. GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [6] 赵炳洋,赵波,张芳,等.构网型逆变器技术综述[J].北京信息科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):57-67. ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, ZHANG Fang, et al. Overview of grid forming inverter technology[J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University (Natural Science Edition), 2022, 37(4): 57-67.
- [7] 屈子森.高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D].杭州:浙江大学,2021:1. QU Zisen. Synchronization stability analysis and control technology of voltage source converter in power system with high penetration renewables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 1.
- [8] 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.
- [9] 秦文萍,魏琦,蔡逸天,等.高比例新能源并网点下配

- 网控保协同技术综述[J/OL]. [2024-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20231201.1040.004.html>.
- QIN Wenping, WEI Qi, CAI Yitian, et al. Review of distribution network collaborated control-protection technology under high proportion of new energy integration[J/OL]. [2024-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20231201.1040.004.html>.
- [10] 张欣悦. 构网型逆变器功率爬坡控制暂态稳定性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023: 1.
- ZHANG Xinyue. Research on transient stability of power climbing control for grid-forming inverters[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023: 1.
- [11] MATEVOSYAN J, BADRZADEH B, PREVOST T, et al. Grid-forming inverters: are they the key for high renewable penetration[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(6): 89-98.
- [12] 卢翔舜, 朱金荣, 王磊. 基于虚拟同步发电机的并离网控制策略优化[J]. 电子设计工程, 2023, 31(13): 156-162.
- LU Xushun, ZHU Jinrong, WANG Lei. Optimization of grid-connected/islanded control strategy based on virtual synchronous generator[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(13): 156-162.
- [13] WU H, RUAN X B, YANG D S, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.
- [14] 张勇, 孙同越, 李云丰, 等. 风电场融合电池储能的稳定性分析及阻尼控制器参数解析计算[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3517-3527.
- ZHANG Yong, SUN Tongyue, LI Yunfeng, et al. Stability analysis and parameters calculation of damping controller for wind power plant integrated with battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3517-3527.
- [15] YI M, HUANG Y H, ZHU D. Research on subsynchronous oscillation of photovoltaic and battery storage systems integrated to weak grid[C]//Proceedings of 2020 4th International Conference on HVDC. Xi'an, China: IEEE, 2020.
- [16] 李翼翔, 田震, 唐英杰, 等. 考虑构网型与跟网型逆变器交互的孤岛微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 11-18.
- LI Yixiang, TIAN Zhen, TANG Yingjie, et al. Small-signal stability analysis of island microgrid considering interaction between grid-forming converter and grid-following converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 11-18.
- [17] 张心怡, 杨波. 考虑构网型和跟网型逆变器的孤岛微电网小信号稳定性分析[J]. 综合智慧能源, 2024, 46(2): 12-18.
- ZHANG Xinyi, YANG Bo. Stability analysis on islanded microgrids with grid-forming and grid-following converters[J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(2): 12-18.
- [18] 刘永慧, 王跃, 彭阳, 等. 提升组网型变流器并网交互稳定性的控制参数整定方法[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 16-27.
- LIU Yonghui, WANG Yue, PENG Yang, et al. Parameter tuning for improving interaction stability of grid-forming converter and power grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 16-27.
- [19] 李旭枫. 基于阻抗分析法的交直流配电关键设备稳定性研究[D]. 南京: 东南大学, 2021: 1.
- LI Xufeng. Research on stability of key equipment in AC/DC distribution network based on impedance analysis method[D]. Nanjing: Southeast University, 2021: 1.
- [20] 任自盼, 鲁宝春, 赵亚龙, 等. 光伏虚拟同步发电机建模与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 92-99.
- REN Zipan, LU Baochun, ZHAO Yalong, et al. Research on modeling and simulation of photovoltaic virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 92-99.
- [21] 程子霞, 于洋, 柴旭峰. 基于协同自适应控制的光储VSG运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 79-85.
- CHENG Zixia, YU Yang, CHAI Xuzheng. Research on operation control of a photovoltaic system with storage VSG based on cooperative adaptive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 79-85.
- [22] 刘洋, 邵广惠, 张弘鹏, 等. 新能源参与系统一次调频分析及参数设置[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 683-689.
- LIU Yang, SHAO Guanghui, ZHANG Hongpeng, et al. Analysis of renewable energy participation in primary frequency regulation and parameter setting scheme of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 683-689.
- [23] 赵大伟, 马进, 钱敏慧, 等. 光伏电站参与大电网一次调频的控制增益研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 425-435.
- ZHAO Dawei, MA Jin, QIAN Minhui, et al. Research on control gain for photovoltaic power plants participating in primary frequency regulation of large power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 425-435.
- [24] 李吉祥, 赵晋斌, 屈克庆, 等. 考虑SOC特性的微电网VSG运行参数边界分析[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1451-1457.
- LI Jixiang, ZHAO Jinbin, QU Keqing, et al. Boundary analysis of operation parameters of microgrid VSG considering SOC characteristics[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1451-1457.
- [25] 王亚军, 杨立波, 马斌, 等. 虚拟同步机惯量及阻尼系数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 88-98.
- WANG Yajun, YANG Libo, MA Bin, et al. Coordinated and optimization strategy of virtual inertia and damping coefficient of a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 88-98.
- [26] 王雪, 刘林, 刘文迪, 等. 基于纵横交叉算法的新型电力系统惯量延迟优化控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 12-20.
- WANG Xue, LIU Lin, LIU Wendi, et al. A novel inertia delay optimal control strategy for new power systems based on crisscross optimization[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 12-20.
- [27] 朱作滨, 孙树敏, 丁月明, 等. 基于储能协调自适应VSG控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 410-419.
- ZHU Zuobin, SUN Shumin, DING Yueming, et al. Research on adaptive VSG control strategy based on energy storage coordination[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(12): 410-419.
- [28] 程爽, 李强, 李先允, 等. 构网型变流器参与因子分析及参数优化[J]. 机械与电子, 2024, 42(7): 20-25.
- CHENG Shuang, LI Qiang, LI Xianyun, et al. Virtual synchro multi-machine system participation analysis and parameter optimization[J]. Machinery and Electronics, 2024, 42(7): 20-25.

(责任编辑 李园)