

参与一次调频的新能源发电并网系统 振荡机理分析与参数优化配置

张振宇¹, 张钢², 栗龙轩¹, 柯贤波¹, 程林¹, 霍沛峥¹, 张浩¹, 别朝红¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国家电网有限公司西北分部, 710049, 西安)

摘要: 为提升新能源并网系统的稳定性, 针对关键参数变化对系统振荡现象的影响机理展开研究, 并提出参数优化配置方案。首先, 建立参与一次调频的典型新能源发电并网系统的状态空间模型, 基于特征值分析辨识并网系统中的主导振荡模式。在此基础上, 分析了 Jacobian 矩阵特征值随系统参数变化的运动轨迹, 揭示了系统发生振荡现象的内在机理, 并利用灵敏度指标及紧相关因子定量分析了不同参数变化对系统动力学稳定性与频率调节的影响规律, 确定影响系统稳定性的关键参数。最后, 提出了基于深度 Q 网络(DQN)算法的新能源一次调频响应参数优化配置方案, 并利用国家电网有限公司西北分部实测数据进行仿真验证。仿真结果表明: 当有功下垂系数增大至 0.005 7 时, 一对共轭复根同时穿越虚轴, 即系统发生 Hopf 分岔而失去稳定性, 并开始出现慢尺度振荡现象。上述参数优化方法不仅提高了电网调频能力, 而且保障了电网的稳定性。

关键词: 新能源并网系统; 动力学稳定性; 紧相关因子分析; 分岔; 参数优化

中图分类号: O322; TM132 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202503012 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0124-11

Analysis of Oscillation Mechanism and Parameter Optimization Configuration for New Energy Power Generation Grid-Connected System Participating in Primary Frequency Modulation

ZHANG Zhenyu¹, ZHANG Gang², LI Longxuan¹, KE Xianbo¹, CHENG Lin¹,

HUO Peizheng¹, ZHANG Hao¹, BIE Zhaohong¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the stability of new energy grid-connected systems, the oscillation mechanism due to variations in key parameters is investigated and a parameter optimization configuration scheme is proposed. Firstly, a state-space model of a typical new energy generation grid-connected system participating in primary frequency modulation is established, and dominant oscillation modes in the grid-connected systems are identified based on eigenvalue analysis. Subsequently, the motion trajectories of eigenvalues of the Jacobian matrix with changes in system parameters are analyzed to reveal the intrinsic mechanism of system oscillations. Sensitivity indicators and tightly related factors are used for quantitative analysis of the impact of parameter variations on system dynamic stability and frequency modulation, identifying the key parameters affecting system stability. Finally, a parameter optimization configuration scheme for new energy primary frequency response based on

收稿日期: 2024-06-30。 作者简介: 张振宇(1974—), 男, 博士生; 张浩(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JM-014)。

网络出版时间: 2024-11-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241127.1939.004>

the deep Q-network (DQN) algorithm is proposed, and simulation verification is conducted using actual data from the Northwest Branch of State Grid Corporation of China. The simulation results indicate that when the active droop coefficient increases to 0.005 7, a pair of complex conjugate roots simultaneously cross the imaginary axis, leading to a Hopf bifurcation and loss of stability in the system, resulting in the emergence of slow-scale oscillations. The proposed parameter optimization method not only enhances the grid's frequency modulation capability but also ensures grid stability.

Keywords: new energy grid-connected system; dynamic stability; tightly related factor analysis; bifurcation; parameter optimization

随着能源危机、环境污染等问题日益受到关注,光伏、风电等新能源产业在近年来发展迅速。越来越多的新能源发电机组经由电力电子换流器接入电网中^[1-2]。随着新能源渗透率的增加,传统同步发电机的比例相对减少,导致电网惯性降低,高比例新能源电力系统频率问题凸显^[3-4]。并网换流器系统自身的强非线性及与电网间的交互作用,使得新能源并网系统的振荡失稳问题更加突出。2024 年,国家电网有限公司西北分部完成一次调频功能改造应用的新能源装机容量已超过 4 000 万 kW,新能源参与至电网一次调频后,提高了电网的调频能力。然而,实际运行中,部分参与一次调频的送端新能源发电并网系统,在某些运行方式及参数环境下会发生振荡现象,影响频率稳定,威胁电网安全。这类振荡在机理上有别于旋转机组惯性和轴系动态主导的传统低频振荡和次同步谐振/振荡^[5-7]。为了保证电网系统的安全稳定运行,有必要对其振荡形态及发生机理进行针对性研究,寻求提升系统稳定性的参数优化方法。

然而,并网系统自身结构的复杂性导致参数变化对振荡行为影响机理的解析较难。为此,构建合适的新能源发电并网系统数学模型及理论分析方法,是研究新能源并网系统稳定性及失稳机理的重要基础。

近年来,国内外学者针对并网系统振荡问题展开了一系列研究。文献[8]利用频域分析法揭示了高水电占比电力系统超低频振荡机理。文献[9-10]采用模态分析方法研究了不同运行状况下含双馈风电场的电力系统低频振荡特性。文献[11]提出了一种考察双馈风力感应电机对电力系统机电振荡模态影响的方法。文献[12]提出了一种系统的阻抗网络模型和定量稳定性分析方法,分析了大型风力发电系统出现的同步振荡问题。文献[13]分析了河北地区双馈风电机组串补输电系统引发的次同步谐振事故,建立了等效的仿真系统,分析了串补等级、风速和控制等对系统次同步谐振的影响。文献[14]分析了参与一次调频的储能型风电场外送系统的振荡特性,但未能揭示振荡现象发生的内在动力学机理。上述研究多

针对振荡行为的表现及稳定性的判定展开研究,但关键参数变化对并网系统振荡行为机理及频率稳定性的影响规律少有涉及。迄今为止,参与一次调频的新能源发电并网系统振荡机理还不够明确,亟需深入研究关键参数对系统动力学稳定性的影响机制^[15]。

新能源机组主要通过逆变器并网,逆变器本身无法感知并响应系统频率的变化,采用虚拟同步发电机控制(virtual synchronous generator control)或下垂控制(droop control),可以使新能源机组参与至电网的一次调频^[16-17]。并网逆变器作为新能源发电与电网间能量传递和转换的桥梁,其与电网相互作用可能引发振荡问题,振荡的频率或稳定性同样受到其一次调频方式的影响。变流器的非线性特征且过载能力有限,使得振荡往往始于小信号负阻尼发散^[5],小信号建模是分析这一问题的基础^[18-20]。因此,可通过建立系统的数学模型,利用以特征值为基础的理论分析体系深入探究关键参数对系统稳定性和动态特性的影响^[21]。

本文以下垂控制作为新能源发电并网系统的控制方式,研究关键参数对参与一次调频的新能源发电并网系统动力学稳定性的影响规律。首先,建立典型新能源发电并网系统的状态空间模型,基于系统特征值类型来区分系统中的振荡模式类型,并筛选得到系统的主导振荡模式。然后,采用特征值灵敏度分析方法和紧相关因子分析方法筛选影响系统动力学稳定性的关键参数,并揭示振荡现象的动力学机理。接着,在此基础上提出新能源一次调频响应参数优化配置方案。最后,利用国家电网有限公司西北分部的实测数据来仿真验证优化配置方案的可行性。

1 参与一次调频的新能源发电并网系统建模

1.1 系统描述

图 1 给出了参与一次调频的典型新能源发电并网系统主电路及控制框图。在主电路中,开关 $S_1 \sim S_6$ 为绝缘栅型双极晶体管(IGBT)及其反并联二极

管; C_{DC} 表示直流母线滤波电容; L_f 和 r_f 分别表示输出滤波电感及其寄生电阻; C_f 为输出滤波电容; L_l 和 r_l 分别为线路电感及其寄生电阻; V_{DC} 和 i_{DC} 分别为新能源输入直流电压与电流; u_{oa} 、 u_{ob} 和 u_{oc} 表示并网系统的输出电压; u_{ga} 、 u_{gb} 和 u_{gc} 表示系统的电网电压; i_{La} 、 i_{Lb} 和 i_{Lc} 为输出滤波电感电流; i_{oa} 、 i_{ob} 和 i_{oc} 表示并网系统的输出电流; i_{ga} 、 i_{gb} 和 i_{gc} 表示系统的电网电流。在控制电路中, P_o 和 Q_o 分别表示有功功率和无功功率的额定值; p_e 和 q_e 分别为瞬时有功功率和无功

功率; 一阶低通滤波器(LPF) 用于滤除瞬时功率中的谐波分量; k_p 和 k_q 分别为有功和无功的下垂系数; ω 和 ω_n 分别为输出电压角频率及其额定值; $\frac{1}{s}$ 为积分环节的传递函数; V_o 为输出电压额定值; θ 和 V^* 分别为参考电压的相角和幅值; u_{dref} 和 u_{qref} 分别为 dq 旋转坐标系下 d 轴和 q 轴参考电压; i_{Ldref} 和 i_{Lqref} 分别为 dq 旋转坐标系下 d 轴和 q 轴参考电流; m_d 和 m_q 分别为 d 轴和 q 轴的 PWM 波占空比; K_{pwm} 为并网系统的等效增益。

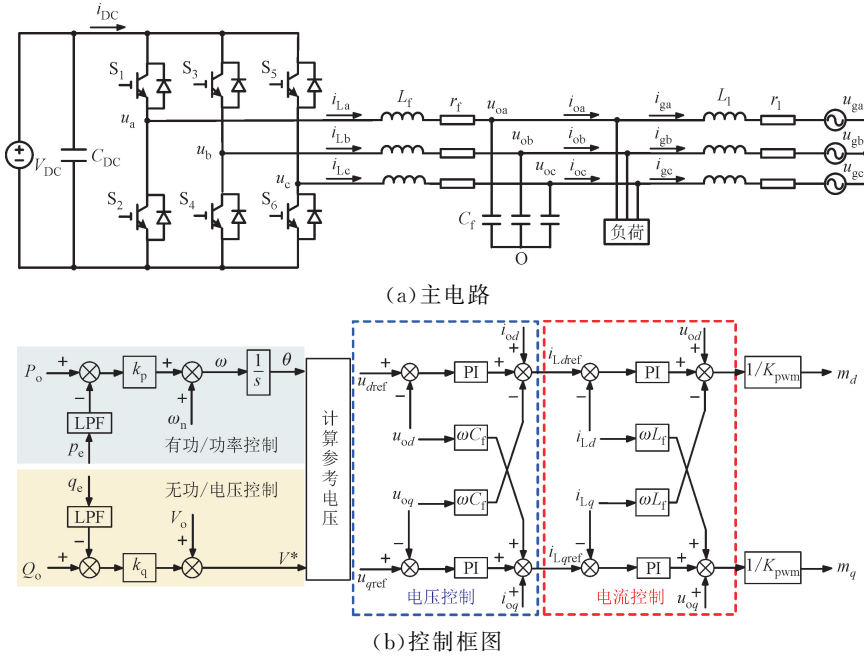


图 1 参与一次调频的典型新能源发电并网系统主电路和控制框图

Fig. 1 Power stage and control diagram of a single-machine grid-connected renewable energy generation system participating in primary frequency regulation

1.2 主电路建模

为了分析图 1 所示并网系统的振荡特性, 下面通过将系统的状态变量在开关周期平均化, 得到该系统主电路状态空间平均方程

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{L_f} \begin{bmatrix} m_a - \frac{m_a + m_b + m_c}{3} \\ m_b - \frac{m_a + m_b + m_c}{3} \\ m_c - \frac{m_a + m_b + m_c}{3} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_{oa} \\ u_{ob} \\ u_{oc} \end{bmatrix} + \frac{r_f}{L_f} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{oa} \\ u_{ob} \\ u_{oc} \end{bmatrix} = \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} - \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{oa} \\ i_{ob} \\ i_{oc} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_a 、 m_b 、 m_c 分别为三相桥臂上管的占空比。

当并网系统三相平衡时, 对式(1)进行 Park 变换, 可得到系统主电路在 dq 旋转坐标系下的方程

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{L_f} \begin{bmatrix} m_d \\ m_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} = \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} - \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

电网侧电网电流 i_{ga} 、 i_{gb} 和 i_{gc} 在 dq 旋转坐标系下的电路方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_l} \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{r_l}{L_l} & -\omega \\ \omega & \frac{r_l}{L_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_l} \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据图 1 并网系统主电路中的 i_{oa} 、 i_{ob} 和 i_{oc} 与

i_{ga} 、 i_{gb} 和 i_{gc} 之间的关系,对式(2)和式(3)进行整理,可得到主电路在 dq 旋转坐标系下的方程

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{L_f} \begin{bmatrix} m_d \\ m_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} = \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} - \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{C_f Z_o} & -\omega \\ \omega & \frac{1}{C_f Z_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_l} \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{r_l}{L_l} & -\omega \\ \omega & \frac{r_l}{L_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_l} \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Z_o 为负荷等值电阻。

1.3 控制电路建模

根据图 1(b),可推导出有功和无功下垂控制环节的表达式^[22]为

$$\begin{cases} \omega = \omega_n + k_p(P_o - P) \\ V^* = V_o + k_q(Q_o - Q) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P 和 Q 分别为平均有功功率、平均无功功率。

根据瞬时功率理论,可得系统输出的瞬时功率表达式为

$$\begin{cases} p_e = \frac{3}{2}(u_{od}i_{od} + u_{oq}i_{oq}) \\ q_e = \frac{3}{2}(u_{oq}i_{od} - u_{od}i_{oq}) \end{cases} \quad (6)$$

因为瞬时功率中含有 2 倍工频分量的谐波,所以需通过 LPF 进行滤波后方可得到平均功率,其中 LPF 滤波器的传递函数为

$$G(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (7)$$

式中: ω_c 为 LPF 滤波器的截止频率; s 为复数变量。

由式(6)和式(7)可得到关于平均功率的表达式

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = \frac{3}{2}(u_{od}i_{od} + u_{oq}i_{oq})\omega_c - \omega_c P \\ \frac{dQ}{dt} = \frac{3}{2}(u_{oq}i_{od} - u_{od}i_{oq})\omega_c - \omega_c Q \end{cases} \quad (8)$$

将式(5)代入式(8),可得到基于下垂控制的功率环在 dq 旋转坐标系下的表达式

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = -\frac{3}{2}k_p\omega_c u_{od}i_{gd} - \frac{3}{2}k_p\omega_c u_{oq}i_{gq} - \frac{3}{2}\frac{k_p\omega_c}{Z_o}u_{od}^2 - \frac{3}{2}\frac{k_p\omega_c}{Z_o}u_{oq}^2 - \omega_c\omega + \omega_c\omega_n + k_p\omega_c P_o \\ \frac{dV^*}{dt} = -\frac{3}{2}k_q\omega_c u_{oq}i_{gd} + \frac{3}{2}k_q\omega_c u_{od}i_{gq} - \omega_c V^* + \omega_c V_o + k_q\omega_c Q_o \end{cases} \quad (9)$$

根据图 1(b),功率环输出 ω 和 V^* 作为给定电压信号的角频率和幅值,由此可得到占空比在 dq 旋转坐标下的表达式

$$\begin{cases} \frac{dm_d}{dt} = \frac{1}{K_{pwm}} \left\{ -k_{vp}k_{ip} \frac{du_{od}}{dt} - k_{vi}k_{ip}u_{od} + k_{ip} \left(\frac{di_{gd}}{dt} + \frac{1}{Z_o} \frac{du_{od}}{dt} \right) - k_{ip}C_f u_{oq} \frac{d\omega}{dt} - k_{ip}C_f \omega \frac{du_{oq}}{dt} - k_{ip} \frac{di_{ld}}{dt} + \frac{du_{od}}{dt} - \omega L_f \frac{di_{lq}}{dt} + k_{ii} \left[-k_{vp}u_{od} - k_{vi} \int u_{od} dt + \left(i_{gd} + \frac{u_{od}}{Z_o} \right) - \omega C_f u_{oq} - i_{ld} \right] \right\} \\ \frac{dm_q}{dt} = \frac{1}{K_{pwm}} \left\{ -k_{vp}k_{ip} \left(\frac{dV^*}{dt} + \frac{du_{oq}}{dt} \right) - k_{vi}k_{ip}(V^* + u_{oq}) + k_{ip} \left(\frac{di_{gq}}{dt} + \frac{1}{Z_o} \frac{du_{oq}}{dt} \right) + \frac{du_{oq}}{dt} + k_{ip}C_f \left(u_{od} \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{du_{od}}{dt} \right) - k_{ip} \frac{di_{lq}}{dt} + \omega L_f \frac{di_{ld}}{dt} + k_{ii} \left[-k_{vp}(V^* + u_{oq}) - k_{vi} \int (V^* + u_{oq}) dt + i_{gq} + \frac{u_{oq}}{Z_o} + \omega C_f u_{od} - i_{lq} \right] \right\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: k_{vp} 和 k_{vi} 为电压控制环路的比例和积分系数; k_{ip} 和 k_{ii} 为电流控制环路的比例和积分系数。

综上所述,将式(4)、式(9)和式(10)整理后,可得到该新能源发电并网系统在 dq 旋转坐标系下的数学模型

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y) \quad (11)$$

式中: $x = [i_{ld}, i_{lq}, u_{od}, u_{oq}, i_{gd}, i_{gq}, \omega, V^*, m_d, m_q]^T$ 为系统的 10 个状态变量; $y = [V_{DC}, P_o, Q_o, Z_o, \omega_n, V_o, u_{gd}, u_{gq}]^T$ 为系统的 8 个输入变量; f 的具体表达式见附录 A。

2 新能源发电并网系统振荡行为机理分析

采用附录 B 中表 B1 所示的系统仿真参数,分别通过理论与数值分析研究系统振荡机理,给出系统的关键参数变化对并网系统动力学稳定性影响的规律。

2.1 振荡模式分析

令 x^* 为系统平衡点,对式(11)在平衡点 x^* 处

进行 Taylor 级数展开并忽略高次项,可以得到系统的 Jacobian 矩阵 $\mathbf{A}$ 。通过求解系统特征方程,可以计算得到系统的 10 个特征值如表 1 所示。表中 j 为虚数单位,即 $j^2 = -1$;10 个特征值的实部均为负值,这意味着系统是渐进稳定的;4 对共轭复特征值 $\lambda_{1,2}$ 、 $\lambda_{3,4}$ 、 $\lambda_{6,7}$ 和 $\lambda_{8,9}$ 表征并网系统的振荡模式;2 个负实数特征值 λ_5 和 λ_{10} 表征并网系统的衰减模式。每种振荡模式可表征一种振荡行为,特征值的实部表征系统响应衰减的快慢,虚部表示振荡的程度。在所有振荡模式中, $\lambda_{8,9}$ 更接近虚轴,表明其对系统的影响最大,因此称 $\lambda_{8,9}$ 为系统的主导振荡模式。主导振荡模式所表征的振荡行为最易对系统的稳定性造成影响。

表 1 并网系统振荡模式

Table 1 Oscillation modes of the grid-connected system			
参数	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	$-3\,452 \pm j8\,536$	1 358.5	0.375
$\lambda_{3,4}$	$-3\,369 \pm j8\,397$	1 336.4	0.372
λ_5	-375		
$\lambda_{6,7}$	$-105 \pm j194$	30.876	0.476
$\lambda_{8,9}$	$-40 \pm j29$	4.615	0.809
λ_{10}	-40		

2.2 特征值灵敏度分析

为了评估系统参数对系统动力学特性的影响,采用特征值灵敏度指标分析量化系统参数的影响。特征值灵敏度表达式为

$$S_{\lambda_i} = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{u} \partial \mathbf{A}(k) / \partial k}{\mathbf{v}^T \mathbf{u}}$$

(12)

式中: k 为给定系统参数; $\mathbf{v}$ 是 $\mathbf{A}$ 对应于特征值 λ_i 的左特征向量; $\mathbf{v}^T$ 是 $\mathbf{v}_i$ 的转置; $\mathbf{u}$ 是 $\mathbf{A}$ 对应于特征值 λ_i 的右特征向量。特征值灵敏度的本质是每个特征值相对于所研究的电路参数的归一化梯度,即其大小表征给定参数的变化对特征值的影响程度,正负号则表示给定参数对特征值的影响方向。

表 2 给出了 9 个关键电路参数的特征值灵敏度。可以看出, $\lambda_{1,2}$ 、 $\lambda_{3,4}$ 、 λ_5 和 $\lambda_{6,7}$ 对线路电感 L_1 的灵敏度最大, $\lambda_{8,9}$ 和 λ_{10} 对有功下垂系数 k_p 的灵敏度最大。线路电感 L_1 增大会使 $\lambda_{1,2}$ 、 $\lambda_{3,4}$ 、 λ_5 和 $\lambda_{6,7}$ 靠近虚轴,同时会使得 $\lambda_{8,9}$ 和 λ_{10} 远离虚轴;有功下垂系数 k_p 增大会使 $\lambda_{6,7}$ 远离虚轴,但会使 λ_5 、 $\lambda_{8,9}$ 和 λ_{10} 靠近虚轴。由于 k_p 对表征主导振荡模式的 $\lambda_{8,9}$ 的灵敏度幅值最大,因此 k_p 是影响图 1 所示新能源发电并网系统动力学稳定性的关键参数。

表 2 系统参数的特征值灵敏度

Table 2 Sensitivity of eigenvalues with respect to system parameters						
参数	$S_{\lambda_{1,2}}$	$S_{\lambda_{3,4}}$	S_{λ_5}	$S_{\lambda_{6,7}}$	$S_{\lambda_{8,9}}$	$S_{\lambda_{10}}$
k_p	$-8 \pm j17$	$21 \pm j8$	1 276	$-10\,684 \pm j1\,067$	$9\,839 \pm j19\,014$	387
k_q	$-106 \pm j98$	$106 \pm j93$	-802	$4\,614 \pm j5\,143$	$-629 \pm j86$	51
k_{vp}	$29 \pm j9\,597$	$30 \pm j9\,868$	32	$-153 \pm j125$	$52 \pm j34$	48
k_{vi}	$0.97 \pm j0.39$	$1.01 \pm j0.41$	-0.09	$0.83 \pm j0.42$	$-1.59 \pm j0.69$	-2.34
k_{ip}	$-325 \pm j828$	$-329 \pm j854$	2.7	$-15 \pm j12$	$5 \pm j3$	5
k_{ii}	$0.1 \pm j0.000\,8$	$0.1 \pm j0.001$	-0.008	$0.08 \pm j0.04$	$-0.16 \pm j0.07$	-0.23
ω_c	$-0.05 \pm j0.05$	$0.05 \pm j0.05$	-4.23	$1.66 \pm j2.89$	$-0.63 \pm j0.81$	0.17
L_1	$13\,470 \pm j353\,300$	$26\,580 \pm j317\,300$	89 690	$27\,220 \pm j32\,770$	$-980 \pm j7\,930$	-50
R_1	$-37 \pm j14$	$-32 \pm j9$	-166	$-193 \pm j109$	$13 \pm j0.5$	-1

为了进一步探究关键参数变化对系统稳定性的影响,下面给出了 k_p 从 0.000 5 变化至 0.009 0 时主导振荡模式 $\lambda_{8,9}$ 的运动轨迹,如图 2 所示。由图可看出,随着 k_p 的增大, $\lambda_{8,9}$ 在复平面左半平面向右移动不断靠近虚轴,这表明系统稳定裕度随着 k_p 增大而降低。当 k_p 增大至 0.005 7 时,一对共轭复特征值 $\lambda_{8,9}$ 穿越虚轴,系统发生了 Hopf 分岔而失去原有的稳定性,即系统出现了振荡现象。此时,特征值 $\lambda_{8,9}$ 为 $\pm j59.2$,振荡频率为 9.422 Hz 远低于开关频率,隶属于慢尺度振荡范畴。

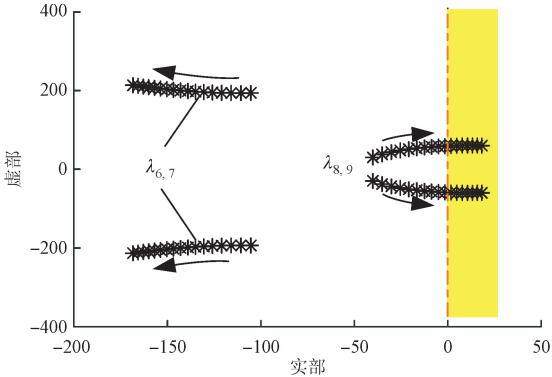


图 2 $\lambda_{8,9}$ 随有功下垂系数 k_p 变化的运动轨迹
Fig. 2 Dominant eigenvalue trajectories when the active power droop coefficient k_p changes

2.3 紧相关因子分析

为了分析振荡模式对状态变量的影响程度,下面通过定义紧相关因子 P_{ik} 来衡量第 k 个特征值 λ_k 与第 i 个状态变量 x_i 间的相关性

$$P_{ik} = \left| \frac{v_{ik} u_{ik}}{v_k^T u_k} \right| \tag{13}$$

图 3 给出了紧相关因子的三维柱状图。由图可以发现,对于 $\lambda_{1,2}$ 和 $\lambda_{3,4}$,所有状态变量的紧相关因子均很小;对于 λ_5 和 $\lambda_{6,7}$,状态变量 i_{Ld} 、 i_{Lq} 、 i_{gd} 、 i_{gq} 的紧相关因子较大;对于主导振荡模式 $\lambda_{8,9}$,状态变量 ω 、 i_{Ld} 、 i_{gd} 的紧相关因子较大;对于 λ_{10} ,状态变量 V^* 的紧相关因子较大。

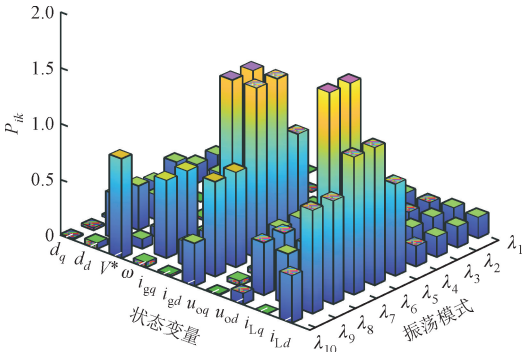


图 3 紧相关因子 P_{ik}
Fig. 3 Participation factor P_{ik}

通过分析特征值灵敏度分析和紧相关因子得出,有功下垂系数 k_p 对主导特征根 $\lambda_{8,9}$ 的灵敏度为 $9\,839 \pm j19\,014$, k_p 是对 $\lambda_{8,9}$ 灵敏度最大的系统参数; $\lambda_{8,9}$ 与电压角频率 ω 的紧相关因子为 0.7,故电压频率 f 与 $\lambda_{8,9}$ 有很大的相关程度。因此,有功下垂系数 k_p 与频率 f 有很强的关联性。

图 4 给出了 k_p 从 0.000 5 增加到 0.001 7 时的频率响应曲线。由图可见, $\lambda_{8,9}$ 从 $-45 \pm j17$ 变化至 $-33 \pm j40$,阻尼比从 0.935 5 降低至 0.636 4,振荡频率从 2.70 Hz 增加至 6.37 Hz,最大频率偏差从

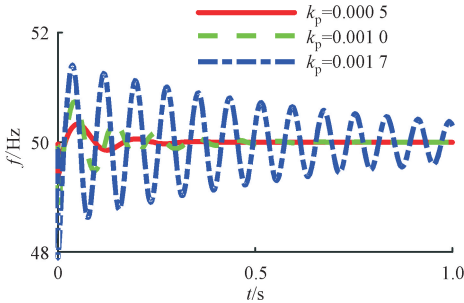
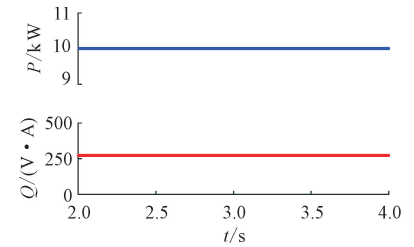


图 4 不同 k_p 时的并网系统频率响应曲线
Fig. 4 Frequency response curves of the single-machine system under different k_p

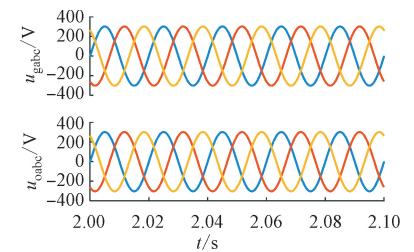
0.25 Hz 增加至 1.10 Hz,频率恢复时间从 0.25 s 增加至 3 s。随着 k_p 增加, $\lambda_{8,9}$ 逐渐接近虚轴,导致稳定裕度和阻尼比降低,系统振荡频率和振幅增加。

2.4 数值结果分析

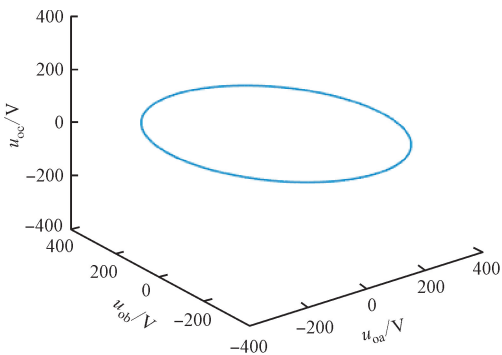
为了验证理论结果,下面根据图 1 所示系统原理图搭建数值仿真模型,对下垂系数 k_p 变化时的系统稳定性进行仿真分析。图 5 给出了 k_p 为 0.001 时系统的时域波形图和相图。从图中可看出,有功功率 P 和无功功率 Q 近乎恒定,逆变器输出电压 u_{oabc} 和电网电压 u_{gabc} 呈现标准的三相交流用电波形,而图 5(c) 所示三维相图中输出电压 $u_{oa}-u_{ob}-u_{oc}$ 呈现圆环状相轨迹,这表明系统运行于稳定的周期运动状态。



(a)有功功率 P 、无功功率 Q 的时域波形



(b)输出电压 u_{oabc} 、电网电压 u_{gabc} 的时域波形



(c)输出电压 $u_{oa}-u_{ob}-u_{oc}$ 相图

图 5 $k_p = 0.001$ 时的数值仿真结果
Fig. 5 Numerical simulation results when $k_p = 0.001$

当 k_p 增加至 0.009 时,系统的时域波形图和相图如图 6 所示。由图中可看出,系统出现了振荡现象,且其振荡频率远小于开关频率。另外,并网系统输出电压 u_{oabc} 和电网电压 u_{gabc} 出现了三相不平衡现象,而 $u_{oa}-u_{ob}-u_{oc}$ 相轨迹由圆环变为环带,这表明系统工作于准周期运动状态。

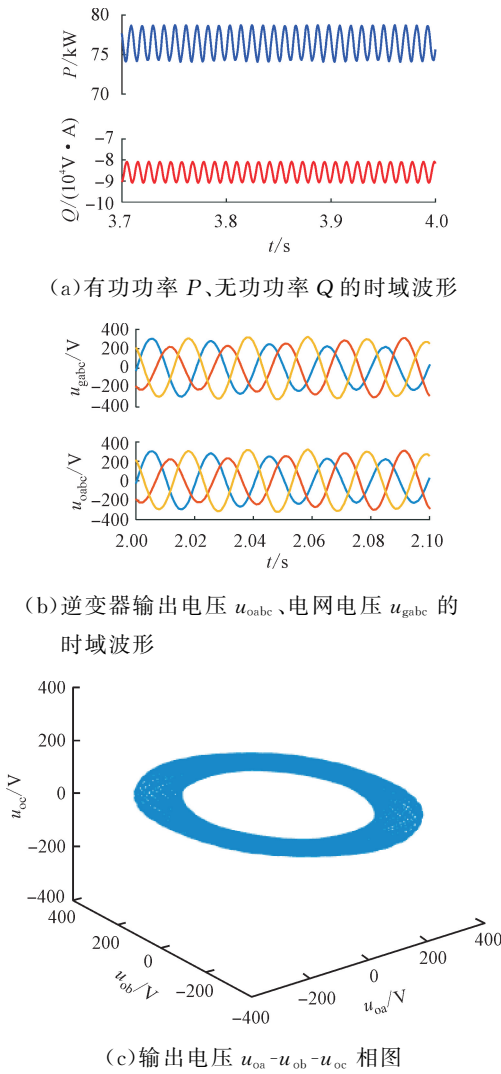


图 6 $k_p=0.009$ 时的数值仿真结果

Fig. 6 Numerical simulation results when $k_p=0.009$

结合图 2 特征值轨迹图和图 6 所示时域波形可以发现, k_p 增大会导致并网系统发生 Hopf 分岔, 出现慢尺度不稳定现象。综上所述, k_p 的增大会削弱系统振荡阻尼, 使得系统各变量达到稳定状态的时

间增加, 以至于电网侧电压出现波动, 降低电网稳定水平。因此, 有功下垂系数 k_p 是影响参与一次调频的新能源发电并网系统稳定性的关键参数。

3 参与一次调频的新能源并网系统参数优化配置方案

3.1 参数优化配置方案

根据上面理论分析结果可知, 新能源机组有功下垂系数 k_p 的设置尤为重要。下面通过对 k_p 进行优化, 在保障系统整体频率安全的前提下, 提高系统频率的恢复速度与稳定性^[23]。实际中, 在下垂系数优化的过程中, 还需要考虑调频死区和限幅环节的影响^[24-25]。对一次调频参数进行综合优化, 建立优化问题的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min & t_r \\ \text{s. t.} & \begin{cases} \zeta > 8\% \\ |f_{db_ht}| < |f_{db_pv}| < |f_{db_w}| \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

式中: t_r 为频率恢复时间, 量化系统频率恢复速度; ζ 为阻尼比, 量化系统需要具备的阻尼特征即稳定性; f_{db_ht} 为水电和火电的调频死区; f_{db_pv} 为光伏的调频死区; f_{db_w} 为风电的调频死区^[25], 根据电源运行特点设定死区约束条件。

电力系统规模巨大、结构复杂, 新能源调频参数的优化需要获得大量的样本数据, 优化工作量巨大。而强化学习能在复杂、不确定且大规模的环境中进行决策和优化, 利用强化学习能提高优化效率和质量。结合优化问题的特点, 采用基于价值函数的深度 Q 网络 (deep Q-network, DQN) 算法进行优化^[26]。本文提出的基于 DQN 算法的调频参数优化方法的结构图如图 7 所示, 优化步骤如下。

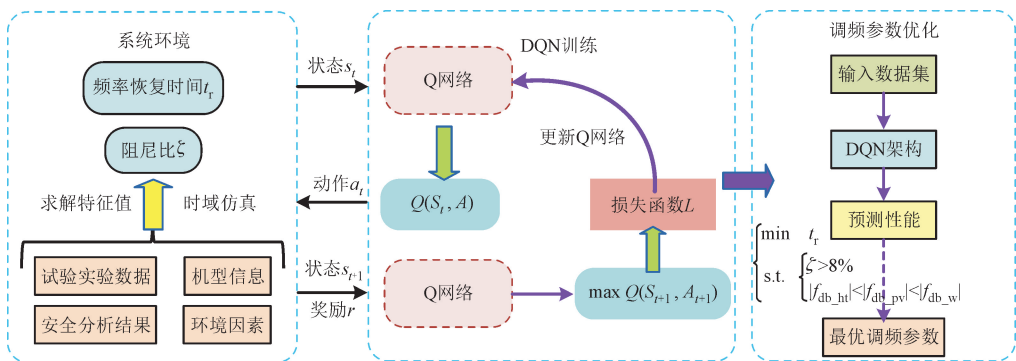


图 7 基于 DQN 算法的调频参数优化方法结构图

Fig. 7 Structure diagram of frequency regulation parameter optimization method based on deep Q-network algorithm

(1)搭建系统环境。需要收集各机组的系统参数(有功下垂系数 k_p 、无功下垂系数 k_q 、线路电感 L_l 、电压环比例系数 k_{vp} 和积分系数 k_{vi} 等)、负荷数据和气象数据,以及电网安全分析数据包括稳定性分析、潮流分析和故障分析数据。利用收集的数据搭建仿真模型,通过典型故障下的时域仿真结果求得频率恢复时间 t_r ,通过系统阻尼分析的特征值求得阻尼比 ζ 。

(2)训练 DQN 架构。系统初始化后,由系统环境获取状态 s_t ,Q 网络根据 s_t 生成所有动作的 $Q(S_t,A_t)$,根据策略选取动作 a_t ;动作 a_t 后,获取新的状态 s_{t+1} 和奖励 r ;根据 Q 网络计算状态 s_{t+1} 时所有动作的 $Q(S_{t+1},A_{t+1})$,选取最大 Q 值的动作 a ,计算损失函数 Loss,利用 Loss 更新 Q 网络。

(3)利用 DQN 架构进行新能源调频参数优化。通过 DQN 架构对数据集进行预测,获得系统性能结果后,根据式(14)所示的目标函数和约束条件筛选最优参数组。

3.2 算例验证

为验证所提优化方案的有效性,以 2023 年国家电网有限公司西北分部新能源一次调频响应试验方式数据(西北新能源装机 1.3 亿 kW,陕西新能源装机 3 000 万 kW,陕北新能源装机 2 000 万 kW)为基础,分别在新能源渗透率 α 为 32%和 48%的情况下,对比故障后调频参数优化前后的系统频率情况,设置的调频参数见表 3。其中,普通参数为该类型新能源机组的通用一次调频参数;优化参数 1 和优化参数 2 分别为针对新能源渗透率 α 为 32%和 48%的情况,利用所提优化方法计算的新能源一次调频参数。

表 3 新能源一次调频参数设置

Table 3 Renewable energy primary frequency regulation parameters setting

参数类型	k_p	调频死区/Hz	限幅/%
普通	0.050	0.05	10
优化 1	0.070	0.08	10
优化 2	0.043	0.10	10

设置 10 s 时陕北地区发生单极直流闭锁,电网功率盈余增加 100 万 kW,陕北 750 母线频率响应曲线如图 8 所示,电网频率对比情况如表 4 所示。

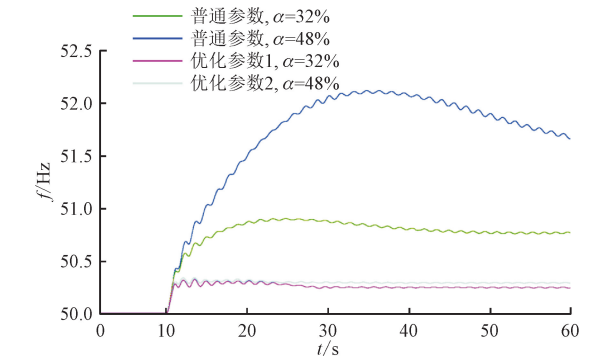


图 8 陕北电网 750 母线频率响应曲线
Fig. 8 Frequency response curves of the 750 busbars of Shaanxi Northern Power Grid

表 4 电网频率对比情况
Table 4 Comparison of power grid frequency

$\alpha/\%$	类别	最大频差/Hz	稳态频差/Hz	稳态时间/s
32	普通	0.9	0.75	30
	优化 1	0.3	0.25	3
48	普通	2.1		
	优化 2	0.3	0.28	3

从以上仿真结果可看出, α 为 32%时,优化参数 1 与普通参数相比,最大频差减小了 0.6 Hz,稳态频差减小了 0.5 Hz,稳态时间减少了 27 s; α 为 48%时,优化参数 2 与普通参数相比,最大频差减小了 1.8 Hz,稳态时间也大大减少。这表明本文所提出的优化配置方法在提高电网调频能力的同时保障了电网的稳定性,且该优化方法能够加强高新能源渗透率电力系统的频率稳定性。

4 结 论

本文在建立参与一次调频的典型新能源发电并网系统数学模型的基础上,通过对 Jacobian 矩阵特征值灵敏度和紧相关因子进行分析,探索了关键参数与主导振荡模式 $\lambda_{8,9}$ 之间的关联关系,研究了关键参数对系统动力学稳定性的影响规律,从而揭示了系统振荡现象产生的内在起因。结果表明,有功下垂系数 k_p 是影响参与一次调频的新能源发电并网系统稳定性的关键参数,同时 k_p 与频率有很强的关联性。值得注意的是,当 k_p 增大至 0.005 7 时,一对共轭复根 $\lambda_{8,9}$ 穿越虚轴,系统发生 Hopf 分岔而失去稳定性,即系统出现了慢尺度振荡现象。此外,采用深度学习 DQN 算法对新能源一次调频响应参数进行了优化配置,并结合国家电网有限公司西北分部的实测数据,仿真验证了该优化配置方法能够在保障电网稳定的同时提高一次调频能力。

参考文献:

- [1] 闵勇, 陈磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 853-867.
MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 853-867.
- [2] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [3] 孙晓强, 刘鑫, 程松, 等. 光伏逆变器参与西北送端大电网快速频率响应能力实测分析 [J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2792-2798.
SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Song, et al. Actual measurement and analysis of fast frequency response capability of PV-inverters in Northwest Power Grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2792-2798.
- [4] 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): 425-433.
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): 425-433.
- [5] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2821-2828.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828.
- [6] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4719-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4719-4731.
- [7] 刘芳, 刘威, 汪浩东, 等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述 [J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 95-114.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-114.
- [8] 王国腾. 高比例可再生能源电力系统频率调节与电压稳定性问题研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [9] 李辉, 陈宏文, 杨超, 等. 含双馈风电场的电力系统低频振荡模态分析 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 17-24.
LI Hui, CHEN Hongwen, YANG Chao, et al. Modal analysis of the low-frequency oscillation of power systems with DFIG-based wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 17-24.
- [10] 杨黎晖, 马西奎. 双馈风电机组对电力系统低频振荡特性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 19-25.
YANG Lihui, MA Xikui. Impact of doubly fed induction generator wind turbine on power system low-frequency oscillation characteristic [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 19-25.
- [11] DU Wenjuan, BI Jingtian, CAO Jun, et al. A method to examine the impact of grid connection of the DFIGs on power system electromechanical oscillation modes [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3775-3784.
- [12] LIU Huakun, XIE Xiaorong. Impedance network modeling and quantitative stability analysis of sub-/super-synchronous oscillations for large-scale wind power systems [J]. IEEE Access, 2018, 6: 34431-34438.
- [13] WANG Liang, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [14] 杨滢, 杨晓雷, 项中明, 等. 参与一次调频储能型风电场的交流外送振荡特性分析 [J]. 智慧电力, 2023, 51(9): 105-112.
YANG Ying, YANG Xiaolei, XIANG Zhongming, et al. Oscillation characteristic analysis of wind farm with energy storage participating primary frequency control [J]. Smart Power, 2023, 51(9): 105-112.
- [15] 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): 683-688.
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): 683-688.

- [16] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [17] LIU Jia, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [18] 宫泽旭, 艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析(一): 机理模型与稳定判据适用性 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4405-4418.
- GONG Zexu, YAERMAIMAITI Ailixier, XIN Huanhai, et al. Small signal stability analysis of equipment in renewable energy power system: part I mechanism model and adaptation of stability criterion [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4405-4418.
- [19] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604.
- WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604.
- [20] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 新能源发电并网系统的小信号阻抗/导纳网络建模方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 26-32.
- XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Small-signal impedance/admittance network modeling for grid-connected renewable energy generation systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 26-32.
- [21] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [22] 张中锋. 微网逆变器的下垂控制策略研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [23] 索江镭, 胡志坚, 刘宇凯, 等. 大规模光伏发电并网对互联电力系统阻尼特性的影响及其阻尼控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(2): 99-105.
- SUO Jianglei, HU Zhijian, LIU Yukai, et al. Influence of large-scale photovoltaic system integration on damping characteristics of interconnected grid and damping control [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 99-105.
- [24] 申家锴, 李卫东, 李正文, 等. 计及一次调频死区与限幅的高比例风电电力系统机组组合 [J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1326-1334.
- SHEN Jiakai, LI Weidong, LI Zhengwen, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering the deadband and limiter of primary frequency response [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1326-1334.
- [25] 张峰, 游欢欢, 丁磊. 新能源一次调频死区影响机理建模及系数修正策略 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 158-167.
- ZHANG Feng, YOU Huanhuan, DING Lei. Influential mechanism modelling of dead band in primary frequency regulation of renewable energy and its coefficient correction strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 158-167.
- [26] ZHAO Shuai, BLAABJERG F, WANG Huai. An overview of artificial intelligence applications for power electronics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4633-4658.

(编辑 亢列梅)

附录 A

参与一次调频的新能源发电并网系统数学模型中 $f=[f_1, f_2, \dots, f_{10}]$, 其具体表达式为

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \frac{V_{DC}}{L_f} m_d - \frac{1}{L_f} u_{od} + \omega i_{Lq}; f_2 = \frac{V_{DC}}{L_f} m_q - \frac{1}{L_f} u_{oq} - \omega i_{Ld}; f_3 = \frac{1}{C_f} i_{Ld} - \frac{1}{C_f} i_{gd} - \frac{1}{C_f Z_o} u_{od} + \omega u_{oq}; \\
 f_4 &= \frac{1}{C_f} i_{Lq} - \frac{1}{C_f} i_{gq} - \omega u_{od} + \frac{1}{C_f Z_o} u_{oq}; f_5 = \frac{1}{L_1} u_{od} - \frac{r_1}{L_1} i_{gd} + \omega i_{gq} - \frac{1}{L_1} u_{gd}; f_6 = \frac{1}{L_1} u_{oq} - \omega i_{gd} - \frac{r_1}{L_1} i_{gq} - \frac{1}{L_1} u_{gq}; \\
 f_7 &= -\frac{3}{2} k_p \omega_c u_{od} i_{gd} - \frac{3}{2} k_p \omega_c u_{oq} i_{gq} - \frac{3}{2} \frac{k_p \omega_c}{Z_o} u_{od}^2 - \frac{3}{2} \frac{k_p \omega_c}{Z_o} u_{oq}^2 - \omega_c \omega + \omega_c \omega_n + k_p \omega_c P_o; \\
 f_8 &= -\frac{3}{2} k_q \omega_c u_{oq} i_{gd} + \frac{3}{2} k_q \omega_c u_{od} i_{gq} - \omega_c V^* + \omega_c V_o + k_q \omega_c Q_o;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_9 = & \frac{1}{K_{\text{pwm}}} \left\{ -k_{\text{vp}} k_{\text{ip}} \frac{\text{d}u_{\text{od}}}{\text{d}t} - k_{\text{vi}} k_{\text{ip}} u_{\text{od}} + k_{\text{ip}} \left(\frac{\text{d}i_{\text{gd}}}{\text{d}t} + \frac{1}{Z_{\text{o}}} \frac{\text{d}u_{\text{od}}}{\text{d}t} \right) - k_{\text{ip}} C_{\text{f}} u_{\text{oq}} \frac{\text{d}\omega}{\text{d}t} - k_{\text{ip}} C_{\text{f}} \omega \frac{\text{d}u_{\text{oq}}}{\text{d}t} - k_{\text{ip}} \frac{\text{d}i_{\text{Ld}}}{\text{d}t} + \frac{\text{d}u_{\text{od}}}{\text{d}t} - \right. \\ & \left. \omega L_{\text{f}} \frac{\text{d}i_{\text{Lq}}}{\text{d}t} + k_{\text{ii}} \left[-k_{\text{vp}} u_{\text{od}} - k_{\text{vi}} \int u_{\text{od}} \text{d}t + \left(i_{\text{gd}} + \frac{u_{\text{od}}}{Z_{\text{o}}} \right) - \omega C_{\text{f}} u_{\text{oq}} - i_{\text{Ld}} \right] \right\}; \\ f_{10} = & \frac{1}{K_{\text{pwm}}} \left\{ -k_{\text{vp}} k_{\text{ip}} \left(\frac{\text{d}V^*}{\text{d}t} + \frac{\text{d}u_{\text{oq}}}{\text{d}t} \right) - k_{\text{vi}} k_{\text{ip}} (V^* + u_{\text{oq}}) + k_{\text{ip}} \left(\frac{\text{d}i_{\text{gq}}}{\text{d}t} + \frac{1}{Z_{\text{o}}} \frac{\text{d}u_{\text{oq}}}{\text{d}t} \right) + \frac{\text{d}u_{\text{oq}}}{\text{d}t} + k_{\text{ip}} C_{\text{f}} \left(u_{\text{od}} \frac{\text{d}\omega}{\text{d}t} + \omega \frac{\text{d}u_{\text{od}}}{\text{d}t} \right) - \right. \\ & \left. k_{\text{ip}} \frac{\text{d}i_{\text{Lq}}}{\text{d}t} + \omega L_{\text{f}} \frac{\text{d}i_{\text{Ld}}}{\text{d}t} + k_{\text{ii}} \left[-k_{\text{vp}} (V^* + u_{\text{oq}}) - k_{\text{vi}} \int (V^* + u_{\text{oq}}) \text{d}t + i_{\text{gq}} + \frac{u_{\text{oq}}}{Z_{\text{o}}} + \omega C_{\text{f}} u_{\text{od}} - i_{\text{Lq}} \right] \right\} \end{aligned}$$

附录 B

表 B1 参与一次调频的新能源发电并网系统仿真参数

Table B1 Simulation parameters of the single-machine grid-connected renewable energy generation system participating in primary frequency regulation			
参数	数值	参数	数值
直流电压 V_{DC}/V	800	无功功率参考值 $q_{\text{ref}}/(\text{kV} \cdot \text{A})$	1
滤波电感 L_{f}/mH	3	额定角频率 $\omega_{\text{n}}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	314
电阻 r_{f}/Ω	0.2	电压额定值 V_{o}/V	311
滤波电容 $C_{\text{f}}/\mu\text{F}$	20	滤波器截止频率 $\omega_{\text{c}}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	32
线路电感 L_{l}/mH	3	电压控制器比例系数 k_{vp}	0.5
电阻 r_{l}/Ω	1	电压控制器积分系数 k_{vi}	10
负载有功功率 p_{L}/kW	28	电流控制器比例系数 k_{ip}	5
负载无功功率 $q_{\text{L}}/(\text{kV} \cdot \text{A})$	1	电流控制器积分系数 k_{ii}	100
有功下垂系数 k_{p}	0.000 5~0.009 0	逆变器等效增益 K_{pwm}	404.145
无功下垂系数 k_{q}	0.015 6	开关频率 f_{s}/kHz	10
有功功率参考值 p_{ref}/kW	10		