

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250778

含风电电力系统的智能广域阻尼控制策略研究

孙正龙¹, 李慎浩¹, 李泽伟¹, 章锐¹, 杨浩¹, 华文², 张程铭²

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 高比例风电接入加剧了风电机组与同步机间的动态耦合, 导致多机广域阻尼控制器(wide area damping controllers, WADC)难以协同整定。在复杂工况下, 多机 WADC 难以有效抑制振荡, 甚至恶化系统阻尼。为解决上述问题, 提出一种面向含风电电力系统的智能广域阻尼控制策略。首先, 建立含双馈风机的多机广域阻尼协同控制模型, 并基于联合测度指标选择广域阻尼控制回路。然后, 构建融合主成分分析(principal component analysis, PCA)与多智能体深度确定性策略梯度(multi agent deep deterministic policy gradient, MADDPG)的控制框架, 实现高维状态空间下的参数协同优化。最后, 在改进的两区域四机系统及我国西北风火打捆送端系统开展仿真分析, 结果表明该策略能够显著提升区域间低频振荡模态的阻尼水平, 在复杂工况下依然具备良好的振荡抑制效果和工程适应性。

关键词: 高渗透率风电; 广域阻尼控制; MADDPG; 多智能体强化学习; 控制器参数协同整定; 主成分分析

Intelligent wide-area damping control strategy for wind-integrated power systems

SUN Zhenglong¹, LI Shenhao¹, LI Zewei¹, ZHANG Rui¹, YANG Hao¹, HUA Wen², ZHANG Chengming²

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology (Northeast Electric Power University), Ministry of Education, Jilin 132012, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: High wind power penetration increases dynamic coupling between wind turbine generators and synchronous machines, making coordinated tuning of wide-area damping controllers (WADCs) challenging. Under complex operating conditions, multiple WADCs may fail to suppress oscillations and may even deteriorate system damping. To address these issues, an intelligent WADC strategy for wind-integrated power systems is proposed. First, a coordinated control model with multiple doubly-fed induction generators (DFIGs) is established, and control loops are selected using a composite geometric index. A hybrid control framework is then developed by integrating principal component analysis (PCA) with the multi-agent deep deterministic policy gradient (MADDPG) algorithm to optimize parameters in high-dimensional state spaces. Finally, simulations on a modified two-area four-machine system and a wind-thermal sending-end system in Northwest China show that the proposed method significantly improves inter-area low frequency damping and maintains effective oscillation suppression performance and engineering adaptability under complex conditions.

This work is supported by the Smart Grid-National Science and Technology Major Project of China (2030) (No. 2024ZD0801000).

Key words: high wind power penetration; wide-area damping control; MADDPG; multi-agent reinforcement learning; coordinated controller parameter tuning; principal component analysis (PCA)

0 引言

高比例风电并网给电网安全稳定运行带来了较大冲击, 尤其是对电力系统小干扰稳定的影响成为

基金项目: 智能电网国家科技重大专项(2030)资助(2024 ZD0801000); 国网浙江省电力有限公司科技项目资助(B311DS25000A)

重点的研究方向, 风电接入会替代传统电源发电, 导致系统惯性下降^[1-3]。双馈感应发电电机(doubly-fed induction generator, DFIG)作为目前应用较为广泛的风电机类型, 现有研究从系统电气距离、锁相环动态特性及动态交互特性等多个角度探讨了其接入对系统模态稳定性的影响^[4-7]。

2025年4月28日发生的“西葡大停电”事故进一步揭示了高风电渗透率给系统稳定性带来的挑

战。事故表明,在持续振荡等扰动工况下,电力系统由于惯性支撑能力不足,难以有效抑制低频振荡,导致频率失稳进而发生连锁故障^[8]。随着风电渗透率的持续上升,DFIG与同步机(synchronous generator, SG)之间的动态交互愈发复杂,尤其在多机控制场景下,不同类型控制器之间缺乏有效协调,已成为影响系统运行稳定性的重要因素。因此,如何在复杂多源系统中实现广域阻尼控制器的高效协同整定,进而提升系统对区间低频振荡的抑制能力,已成为保障电网稳定运行的关键,亟需开展深入研究。

近年来,为应对高比例风电并网带来的区域间振荡问题,广域阻尼控制器(wide-area damping controller, WADC)作为一种基于广域测量信号的振荡抑制手段,得到了广泛研究与工程部署^[9]。文献^[10]提出在DFIG的控制回路加入附加阻尼控制器进行低频振荡抑制;文献^[11]提出了一种基于本地信号的DFIG阻尼控制结构,但由于本地信号能观性较差,该方法难以对区间振荡进行有效抑制。文献^[12]在SG励磁控制中引入附加阻尼控制,增强其对关键模态振荡的响应能力。文献^[13]提出了一种基于径向基函数的动态阻尼补偿自适应控制策略,可根据系统频率变化对系统阻尼进行动态调节。然而,目前大部分研究仍聚焦于单一类型发电单元的广域阻尼控制策略优化,针对SG与DFIG联合参与广域阻尼控制的研究相对较少。尤其在比例风电并网背景下,电源结构日益多样化,控制器间的协调需求不断增强。如何实现多控制器间的参数协同优化,以提升系统整体的模态阻尼水平和动态稳定性,已成为广域阻尼控制领域亟需解决的关键问题^[14]。

针对上述问题,部分学者通过优化控制器参数,以更有效地抑制低频振荡。文献^[15]基于阻尼系数灵敏度解析式,计算并配置SG的阻尼系数,文献^[16]采用改进鸟群算法对附加双通道广域阻尼控制参数进行整定,文献^[17]基于人工蜂群算法对自抗扰控制器和广域阻尼控制器进行协调优化以增强系统的稳定性。文献^[18]通过 H_2/H_∞ 构造多目标函数优化控制器参数。尽管上述方法在某些工况下能够提升系统阻尼性能,但在不同场景中仍难以保持良好的控制效果。相比之下,强化学习算法,尤其是多智能体深度强化学习算法(multi-agent deep reinforcement learning, MADRL)广泛应用于复杂控制系统,在多控制器协同整定场景中展现出良好前景。其中,多智能体深度确定性策略梯度算法(multi agent deep deterministic policy gradient, MADDPG)结合了“集中训练-分布执行”框架,使其在多控制器协同优化等复杂问题中表现出较强的适应性。然

而,在高比例风电接入电力系统中,系统状态空间维度高、变量耦合复杂, MADDPG在处理此类非线性大系统时仍面临诸多挑战^[19]。具体而言,状态输入中存在大量冗余变量,模态特征表达不清晰,导致策略训练收敛困难,且在振荡模态频繁变化的复杂运行工况下控制效果不稳定。

在高比例风电并网系统中,运行方式的多变性以及DFIG与SG之间复杂的动态交互,使系统状态空间维度显著增大,不仅削弱了传统阻尼控制策略的适应性,也显著增加了两类机组协同控制策略的优化整定难度。为了应对高比例风电接入背景下的区间低频振荡问题,本文设计了一种智能广域阻尼协同控制策略。该方法通过联合几何测度法选择WADC的部署位置及反馈信号,并引入主成分分析(principal component analysis, PCA)机制对高维状态信息进行降维处理,以增强控制策略的稳定性。在MADDPG框架下,不同WADC作为独立智能体进行策略训练与参数优化,实现控制器间的协同整定。最后,在改进的两区域四机系统及西北风火打捆送端系统上进行仿真,以验证该策略在多运行工况下对低频振荡的抑制效果及适应性。

1 含风电系统的广域阻尼协同控制

1.1 含风电电力系统的阻尼特性

本文首先建立了DFIG的机电暂态模型,并在此基础上将其与系统线性化模型结合,进行阻尼特性分析。

DFIG已在现代风电场中得到广泛应用,具有典型的机械-电气双环动态结构。其机械侧主要包括风轮、传动轴、齿轮箱及发电机轴,传动系统中风轮侧与发电机侧之间存在弹性耦合,可用双质量结构对其建模。在电气侧,采用 $d-q$ 旋转坐标系建立DFIG的机电暂态模型,以准确描述其在扰动过程中的动态行为。机电暂态模型表示为

$$\begin{cases} \mathbf{p}\mathbf{x}_{\text{SG}} = \mathbf{f}_{\text{SG}}(\mathbf{x}_{\text{SG}}, \mathbf{y}_{\text{SG}}, \mathbf{y}_{\text{DAE}}) \\ \mathbf{p}\mathbf{x}_{\text{DFIG}} = \mathbf{f}_{\text{DFIG}}(\mathbf{x}_{\text{DFIG}}, \mathbf{y}_{\text{DFIG}}, \mathbf{y}_{\text{DAE}}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}_{\text{SG}}(\mathbf{x}_{\text{SG}}, \mathbf{y}_{\text{SG}}, \mathbf{y}_{\text{DAE}}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}_{\text{DFIG}}(\mathbf{x}_{\text{DFIG}}, \mathbf{y}_{\text{DFIG}}, \mathbf{y}_{\text{DAE}}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}_{\text{DAE}}(\mathbf{y}_{\text{DAE}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{p} 表示微分算子; \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 分别为状态变量和代数变量的向量形式; \mathbf{f} 、 \mathbf{g} 分别为状态向量和代数方程的函数形式; 下标 SG、DFIG 分别表示同步发电机系统与双馈风电系统的线性化状态变量; 下标 DAE 表示由微分-代数方程组线性化得到的整体系统状态变量。

为分析含风电电力系统在小扰动下的动态特性，在稳态运行点对系统模型进行线性化。

$$\begin{cases} p\Delta x = A_{DAE} \Delta x \\ A_{DAE} = A - BD^{-1}C \end{cases} \quad (2)$$

式中： A 、 B 、 C 、 D 分别为线性化得到的系统状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵和直接传递矩阵； A_{DAE} 由微分-代数方程组在当前工况下线性化得到的系统状态矩阵； Δx 表示状态变量相对于稳态运行点的小扰动向量。为揭示风电渗透率变化对系统阻尼性能的影响，将系统中 SG 与 DFIG 的动力学联立，可得到状态空间表达式^[20]为

$$\frac{dX}{dt} = A_{eq}(\rho) \cdot X \quad (3)$$

式中： X 表示系统状态变量，包含同步机的功角、励磁系统状态、DFIG 的电气变量及控制状态量等； $\rho = S_{wind}/S_{total}$ 为风电渗透率， S_{wind} 和 S_{total} 分别为风电容量和系统总容量； A_{eq} 为等效系统状态矩阵。系统状态矩阵关于风电渗透率的表达式为

$$A_{eq}(\rho) = (1 - \rho) \cdot A_{SG} + \rho \cdot A_{DFIG} \quad (4)$$

式中： A_{SG} 和 A_{DFIG} 分别为 SG 与 DFIG 的线性化矩阵。由于 DFIG 控制结构对系统扰动的响应存在时滞，惯量与阻尼贡献较弱，因此 A_{DFIG} 导致系统阻尼能力下降。系统特征值由式(5)方程计算所得。

$$A_{eq} \cdot v_i = \lambda_i \cdot v_i, \lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (5)$$

式中： λ_i 为系统的第 i 个特征值；实部 σ_i 表示阻尼因子；虚部 ω_i 表示振荡角频率； v_i 为对应的特征向量。系统阻尼比 ζ_i 可表示为

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (6)$$

当风电渗透率 ρ 增大时，系统中同步发电机的作用减弱，而 DFIG 所主导的弱惯性、弱阻尼动态成分增大，导致特征值实部 σ_i 向虚轴靠近，即风电渗透率越高，阻尼比越低，系统由强阻尼状态逐渐过渡到弱阻尼状态。充分说明高比例风电接入对系统稳定性构成挑战。

1.2 多机广域阻尼协同控制模型

为应对风电接入引起的系统主导模态阻尼水平下降，本文在 DFIG 与 SG 中分别部署 WADC，构建了 DFIG-SG 的多机广域协同控制框架。

在控制实现层面，为有效调控 DFIG 的功率输出，本文采用 PQ 解耦控制策略。该策略通过调节转子侧电流的幅值与相位，分别控制 DFIG 的有功功率和无功功率输出，具体结构如图 1 所示。图中详细变量定义参考文献^[21]。

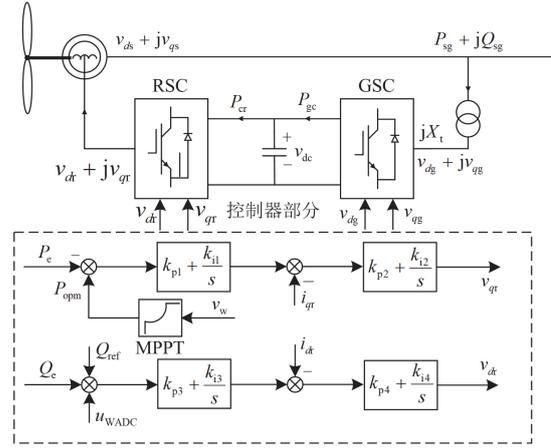


图 1 双馈风电机组机电暂态模型

Fig. 1 Electromechanical transient model of a doubly-fed induction generator

从控制结构上看，DFIG 本身对电力系统低频振荡的响应能力相对有限。为提升其阻尼贡献，本文借鉴 SG 励磁系统中电力系统稳定器的设计原理，引入一种基于转子速度偏差信号的速度型 WADC，如图 2 所示。

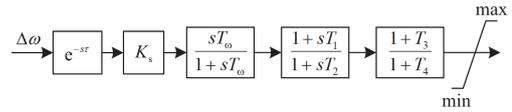


图 2 广域阻尼控制器结构

Fig. 2 Structure of wide-area damping controller

该控制器结构包括增益调节模块、时滞补偿模块、隔直环节、相位补偿模块及限幅器等。为了能够模拟通信过程中的固定延迟特性，本文建模取值为 100 ms^[22]。

在具体部署中，WADC 分别接入 DFIG 的无功功率控制通道及 SG 的励磁系统中，分别用来调节 DFIG 的无功功率输出与 SG 的电磁转矩，从而实现多机协同的低频振荡抑制。多机广域阻尼协同控制模型如图 3 所示。

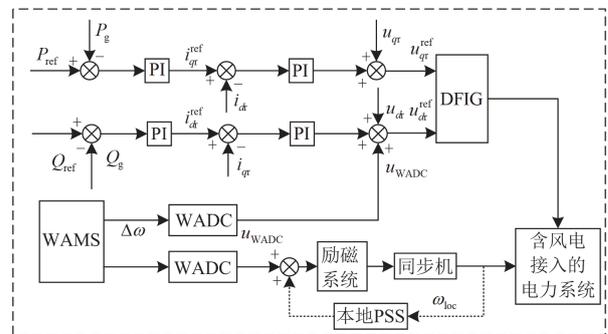


图 3 含风电接入的多机广域阻尼协同控制模型

Fig. 3 Multi-machine wide-area damping coordinated control model under wind power integration

图3中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为定子的有功、无功功率参考值; P_g 、 Q_g 分别为系统的有功、无功功率; i_{dr}^{ref} 、 i_{qr}^{ref} 分别为 d 、 q 轴转子电流参考值; i_{dr} 、 i_{qr} 分别为转子绕组电流的 d 、 q 轴分量; u_{dr}^{ref} 、 u_{qr}^{ref} 分别为转子电压参考值的 d 、 q 轴分量; u_{WADC} 为广域阻尼控制器提供的控制电压; ω_{loc} 为本地发电机提供的角速度; $\Delta\omega$ 为转子速度偏差量。

2 智能广域阻尼控制策略

2.1 多机 WADC 参数协同优化问题建模

为实现多控制器之间的协同参数整定, 本文将多机 WADC 参数优化问题建模为一个多智能体强化学习任务。每个控制器视为一个智能体, 通过与电力系统仿真环境的不断交互直至学习到最优控制策略。结合 MADDPG 算法结构, 本文明确了该控制任务中的 4 个关键要素, 具体如下。

状态空间(State): 包含各关键节点的频率偏差、相对功角差、模态阻尼比、风电出力等系统运行变量。为保证广域信号的可观测性与模态敏感性, 本文采用 PCA 对原始高维状态信息进行降维处理, 提取关键状态信息作为智能体输入。

动作空间(Action): 为待优化的 WADC 参数集合, 每个智能体负责调节其对应的 WADC 的参数, 包括增益系数 K 、超前滞后时间常数 T_1, T_3 。本文将部署的每个 WADC 分别映射为一个独立智能体, 使其依据状态输入, 输出与自身控制器结构对应的控制器参数组合。参数约束范围为^[23]

$$K_1 \in [0.01, 100], T_1, T_3 \in [0.01, 10] \quad (7)$$

奖励函数(Reward): 构建如式(8)所示的以系统主导模态阻尼比提升量为主要指标, 辅以频率偏差惩罚的复合奖励 r , 用于指引控制策略的优化方向。

$$r = \max \sum_{t=0}^T \gamma^t \left[-|\zeta_c(t) - \zeta_0| + \alpha(f_0 - f_c(t))^2 \right] \quad (8)$$

式中: $\zeta_c(t)$ 、 $f_c(t)$ 分别为 t 时间步下系统的阻尼比和频率; ζ_0 为设定的目标阻尼比; f_0 为系统稳定频率, 一般取 50 Hz; γ 为折扣因子, 通常取值为 0~1; α 为权重因子, 表示频率对奖励的影响。

环境(Environment): 为基于 Python 和 DiGSILENT 联合仿真平台搭建的含双馈风机接入的多机系统模型, 环境根据智能体下发的动作进行仿真进而输出系统状态, 并反馈奖励。

基于上述模型, PCA-MADDPG 算法能够在“集中训练-分布执行”框架下实现智能体的策略优化。

2.2 融合 PCA 的多智能体协同优化结构设计

在高比例风电接入的场景下, 系统运行状态呈现出高度非线性、多源耦合等特征^[24], 使得广域测量系统采集的状态变量维度增大。为此, 本文引入 PCA 对状态空间进行前端降维, 构建低冗余且判别性强的状态输入。

PCA 是一种经典无监督线性降维方法, 其核心是通过协方差分析提取原始多变量数据中的关键成分, 并构建新的正交特征空间用于数据压缩^[25]。

设原始状态变量向量 $s_i \in \mathbf{R}^n$, 其样本协方差矩阵 \mathbf{C} 为

$$\mathbf{C} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (s_i - \bar{s})(s_i - \bar{s})^T \quad (9)$$

式中: \bar{s} 为样本均值向量; m 为样本总数。对协方差矩阵 \mathbf{C} 进行特征值分解, 可得

$$\mathbf{C}\mathbf{U} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda} \quad (10)$$

式中: \mathbf{U} 为特征向量矩阵; $\mathbf{\Lambda}$ 为对应特征值的对角矩阵。选取前 k 个主成分构建投影矩阵 $\mathbf{U}_k \in \mathbf{R}^{n \times k}$, 则降维后的状态输入为

$$\hat{s}_i = \mathbf{U}_k^T (s_i - \bar{s}) \quad (11)$$

式中: $\hat{s}_i \in \mathbf{R}^k$ 表示降维后的状态信息。

1) PCA-MADDPG 协同优化算法设计

在 PCA-MADDPG 框架下, 仿真环境输入的原始高维状态首先经 PCA 模块进行主成分分析并降维处理, 所得低维状态作为各智能体策略网络的输入。每个智能体感知当前状态, 输出相应的控制器参数进而调节对应的控制器输出。PCA-MADDPG 结构如图 4 所示。

其中, 评价网络基于联合“状态-动作”对进行 Q 值估计, Q 为联合“状态-动作”对的评估指标, 为增强网络稳定性, 引入了梯度裁剪机制。策略网络则负责生成控制器参数组合, 完成控制策略的动作输出。该结构构成一套具备状态压缩能力、策略协同机制的多机广域阻尼协同控制闭环系统。

2) PCA-MADDPG 参数协同整定流程

本文基于“集中训练-分布执行”的策略框架进行多机控制器参数协同整定, 该框架支持多个智能体共享环境状态, 并通过联合经验回放池实现样本的批量采样与策略更新。PCA-MADDPG 算法训练流程分为以下几个主要阶段, 具体优化流程见表 1。

(1) 网络初始化: 初始化各智能体的策略网络 $\pi_i(a_i | s_i; \theta_i)$ 与评价网络 $Q_i(a_i | s_i; \phi_i)$, 并构建目标网络 π'_i 、 Q'_i 。建立经验回放池 \mathbf{D} , 用于存储样本。

(2) 状态观测与降维处理: 由仿真平台生成系统状态 s_i , 经 PCA 模块处理后得到压缩状态向量 \hat{s}_i ,

作为各智能体策略网络的输入。

(3) 动作选择与环境交互: 各智能体根据当前策略网络输出控制器参数向量组合 \mathbf{a}_t , 作用于仿真环境, 系统反馈下一状态 \mathbf{s}_{t+1} 与即时奖励 r_t 。

(4) 经验采集与样本存储: 将 $(\hat{\mathbf{s}}_t, \mathbf{a}_t, r_t, \hat{\mathbf{s}}_{t+1})$ 交互样本组成经验元组存入经验池 D , 训练时从经验池中随机采样, 并添加噪声以提升探索性。

(5) 网络更新与策略优化: 基于采样样本计算时序差分(temporal difference, TD)误差, 更新评价网络, 利用策略梯度优化策略网络。

(6) 训练终止判定: 在完成上述步骤后, 检查是否满足停止条件。如果未满足, 则重置网络状态并继续迭代, 直到满足停止条件; 否则, 训练结束, 并输出最终网络参数或策略。

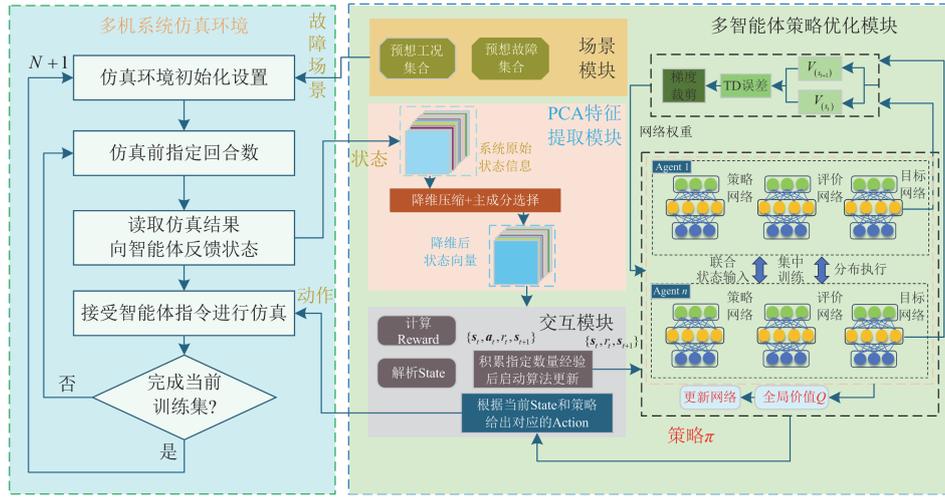


图 4 PCA-MADDPG 多智能体广域阻尼控制策略协同优化架构

Fig. 4 Coordinated optimization architecture of the PCA-MADDPG-based multi-agent wide-area damping control strategy

表 1 PCA-MADDPG 协同优化流程

Table 1 PCA-MADDPG collaborative optimization workflow

算法 1: 基于 PCA-MADDPG 的多机广域阻尼控制器参数协同整定算法
输入: 系统状态向量
输出: 控制器参数
1: 初始化策略网络和价值网络 μ_i 和 Q_i , 环境模型 E , 主成分矩阵 U , 经验池 D ;
2: 初始化目标网络: $\mu'_i \leftarrow \mu_i$, $Q'_i \leftarrow Q_i$;
3: For 每一训练回合 do:
4: 从环境初始化系统状态 s_t
5: For 每一步 do:
6: 对当前状态执行 PCA 降维: $\hat{s}_t \leftarrow \text{PCA}(s_t)$
7: 各 agent(i) 接受 \hat{s}_t 生成控制器参数 \mathbf{a}_t ;
8: 将 \mathbf{a}_t 传递至环境, 获取奖励 r_t 、下一状态 \mathbf{s}_{t+1} ;
9: 对下一状态进行 PCA 降维: $\hat{s}_{t+1} \leftarrow \text{PCA}(\mathbf{s}_{t+1})$;
10: 存储 $(\hat{s}_t, \mathbf{a}_t, r_t, \hat{s}_{t+1})$ 至经验回收池 D ;
11: If 经验池已满 then:
12: 从 D 中随机采样训练样本;
13: 更新 Critic 网络参数 θ^ϕ ;
14: 更新 Actor 网络参数 θ^π ;
15: 软更新目标网络 μ' 和 Q' ;
16: End For;
17: End For.

本文将控制器参数的整定问题建模为一个马尔科夫决策过程。为获得最优策略 π_θ , 采用确定性策略梯度构建如式(12)所示的优化目标 $J(\theta)$ 。

$$\max_{\theta} J(\theta) = E_{s \sim E} [Q^\pi(s_t, \mathbf{a}_t)] \quad (12)$$

式中: $Q^\pi(s_t, \mathbf{a}_t)$ 为当前策略下的动作-状态值函数; E 为数学期望; $s \sim E$ 表示状态从环境中随机取样; $\mathbf{a}_t = \pi_\theta(s_t)$ 表示智能体根据当前策略网络输出动作为 \mathbf{a}_t , π_θ 表示参数化的策略函数; θ 为策略网络参数。其策略梯度表达式为

$$\nabla_{\theta} J(\theta) = E_{s \sim D} \left[\nabla_{\mathbf{a}} Q^\pi(s_t, \mathbf{a}_t) \Big|_{\mathbf{a}_t = \pi_\theta(s_t)} \nabla_{\theta} \pi_\theta(s_t) \right] \quad (13)$$

式中: $\nabla_{\theta} \pi_\theta(s_t)$ 为策略网络对参数的梯度; $s \sim D$ 表示状态从经验池中随机取样。评价网络用于逼近真实的 $Q^\pi(s, a)$, 其目标函数 \tilde{y} 采用最小均方差 $L(\phi)$ 进行构建。目标网络采用式(15)所示的软更新机制。

$$L(\phi) = E_{(s_t, \mathbf{a}_t, r_t, \hat{s}_{t+1})} [(Q^\pi(s_t, \mathbf{a}_t) - \tilde{y})^2] \quad (14)$$

$$\tilde{y} = r_t + \gamma Q_{\phi'}(s_{t+1}, \pi_{\theta'}(s_{t+1})) \quad (15)$$

式中: ϕ 为评价网络的参数; ϕ' 为目标评价网络参数; θ' 为目标策略网络参数; \tilde{y} 为目标 Q 值。

综上, 本文所提 PCA-MADDPG 算法在 MADDPG 算法的基础上融合了 PCA 状态压缩及主

成分选择机制。训练完成后, 该策略可为各 WADC 输出控制参数。

3 算例分析

为验证所提控制策略在高风电渗透率的复杂工况下抑制低频振荡的有效性, 本文基于 DigSILENT 仿真平台, 搭建了改进的两区域四机系统与我国西北电网风火打捆送端系统进行测试。

3.1 改进的两区域四机系统

本文基于改进的两区域四机系统仿真算例, 引入具备可调容量的双馈风电场 WF_1 , 设置测试场景的风电渗透率为 20%~60%。系统拓扑结构如图 5 所示, 其中同步发电机 $G_1 \sim G_4$ 容量均为 900 MVA。系统具体参数见文献[26]。

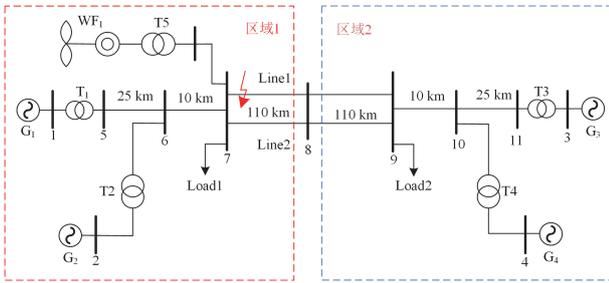


图 5 含双馈风电机组的改进两区域四机系统模型

Fig. 5 Modified two-area four-machine system model with doubly-fed induction wind generators

通过特征值分析法, 在不同风电渗透率下提取系统区间振荡模态的特征值及阻尼比, 结果见表 2。

表 2 不同风电渗透率下区间主导振荡模态特性

Table 2 Characteristics of inter-area dominant oscillation modes under different wind power penetration levels

风电渗透率/%	实部	虚部	阻尼比/%	振荡频率/Hz
20	-0.123	±3.047	4.03	0.485
40	-0.101	±2.941	3.43	0.468
60	-0.074	±2.858	2.59	0.455

基于前述模态特性, 采用联合几何测度法选取 WADC 的安装位置与反馈信号^[27]。根据表 3 结果, 选取 WADC 的安装位置为 G_3 与 WF_1 , 反馈信号为 G_1 与 G_3 的角速度偏差 $\Delta\omega_{13}$ 。

为确保所提的 PCA-MADDPG 控制策略在不同工况下具备鲁棒性, 本文在前述仿真平台基础上引入风速扰动, 扩展状态空间分布范围, 构建多扰动、多渗透率的训练环境。各智能体采用表 4 所示的神经网络结构与超参数配置, 并在“集中训练-分布执行”框架下进行策略优化。

表 3 可观/可控性联合测度

Table 3 Joint controllability and observability metrics

发电机	可观/可控性联合测度			
	$\Delta\omega_{12}$	$\Delta\omega_{13}$	$\Delta\omega_{23}$	$\Delta\omega_{24}$
G_1	0.85	0.82	0.80	0.73
G_2	0.81	0.78	0.53	0.75
G_3	1.00	0.97	0.91	0.83
G_4	0.84	0.83	0.76	0.73
WF_1	0.91	0.87	0.86	0.76

表 4 PCA-MADDPG 算法的参数设置

Table 4 Parameter settings of PCA-MADDPG algorithm

参数	取值
智能体记忆库容量	30 000
折扣因子	0.995
动作网络学习率	0.0001
评价网络学习率	0.001
更新神经网络的批度大小	64
隐藏层数	3
每层隐藏神经元数量	128/256/128
PCA 主成分保留数	5
压缩后状态维度	5

如图 6 所示, DDPG 由于缺乏多智能体间的协同机制, 在高维状态空间下整体奖励值较低, 策略学习效果较差。相比之下, MADDPG 基于“集中训练-分布执行”框架实现策略协同优化, 收敛步数及奖励值较 DDPG 提升明显。PCA-MADDPG 方法通过 PCA 模块压缩并优化输入状态, 在 1760 步左右逐步收敛, 最终奖励值稳定在 -20。相比于其他算法, 本文所提方法在加快策略收敛速度的同时获得了更高的最终奖励值, 体现出其在复杂运行工况下的策略学习优势。

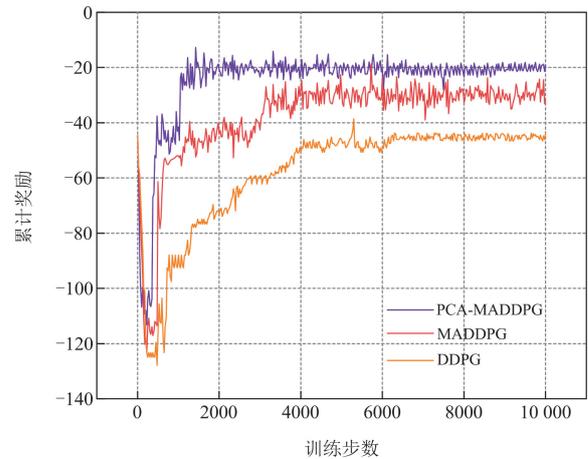


图 6 不同算法训练过程累计奖励变化曲线

Fig. 6 Cumulative reward curves during training for different algorithms

为验证所提控制策略在高风电渗透率背景下的控制性能,本文选取风电渗透率为40%的典型运行工况,在改进的两区域四机系统中引入母线Line1的三相短路故障,故障持续时间为0.1 s。分别对比无WADC、固定参数WADC、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、DDPG、MADDPG以及本文提出的PCA-MADDPG控制策略在扰动下的频率、有功功率与相对功角响应。

时域响应仿真结果如图7所示,无WADC方法无法抑制振荡,固定参数的WADC及未优化的PSO、DDPG方法无法有效抑制低频振荡。MADDPG在一定程度上可实现振荡衰减控制,但在振荡抑制方面仍存在不足。相比之下本文提出的PCA-MADDPG控制策略功角振荡幅度减少约36.8%,且在9.6 s左右实现稳定,有效提升了系统的运行稳定性。其他渗透率工况(20%、60%)响应结果趋势与分析一致。

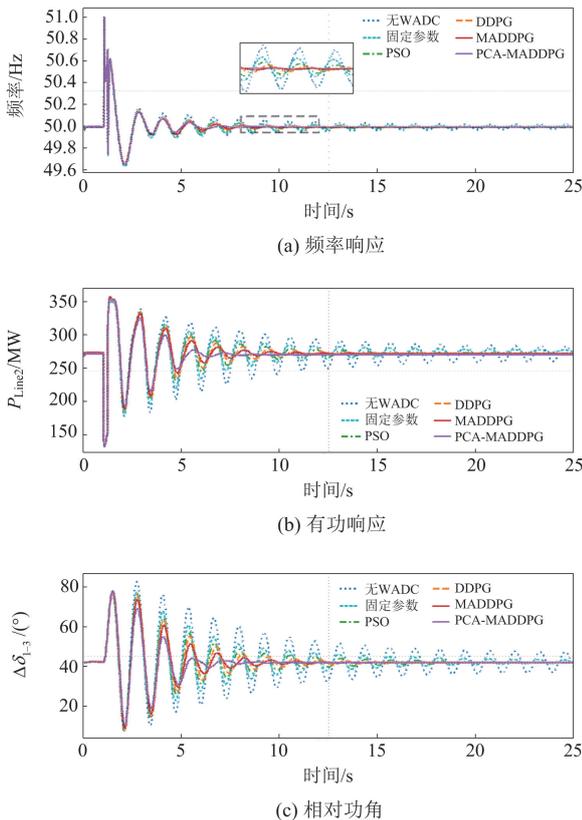


图7 不同控制策略响应对比图

Fig. 7 Response comparison under different control strategies

为从模态层面对不同方法的控制效果进行分析,本文以系统主导振荡模态的特征值为评价指标,对比各方法作用后特征值分布及阻尼比提升情况。

如图8所示,在主导模态阻尼比提升方面,本

文的PCA-MADDPG策略达到了126.92%。这意味着所提策略不仅能更快抑制振荡,也能将系统阻尼提升至理想水平。各方法优化后所得到的广域阻尼控制器参数见附录A表A1。

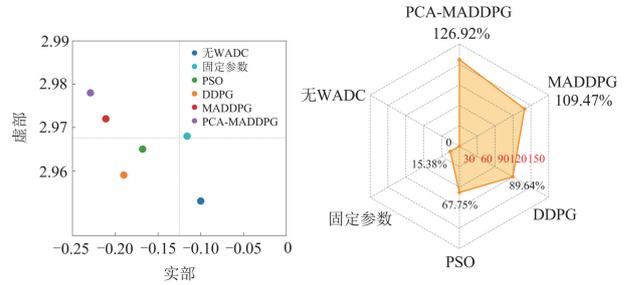


图8 主导模态特征值分布与阻尼特性对比

Fig. 8 Comparison of dominant mode eigenvalue distribution and damping characteristics

3.2 风火打捆送端系统

为验证所提策略在实际工程系统中的可行性,本文在我国西北电网风火打捆送端系统上构建了仿真平台。该系统中风电、光伏两种新能源总装机容量为8400 MW,常规能源装机容量为7800 MW。系统可划分为如图9所示的2个区域。火电机组参数、新能源机组参数、新能源控制策略等见文献[28]。基于前述联合几何测度法确定WADC安装位置为Gen1B-62、Gen1A-5和Gen风F,反馈信号选取Gen1B-62与Gen1A-5的角速度偏差 $\Delta\omega_{62-5}$ 。

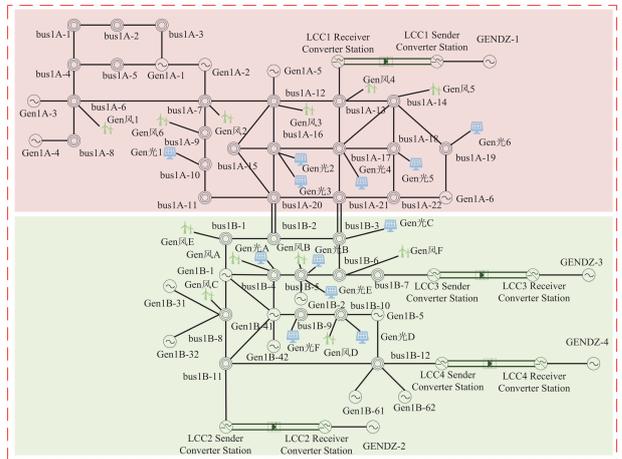


图9 风火打捆送端系统

Fig. 9 Wind-thermal bundled sending-end system

为验证所提策略在多运行工况下的适用性,本文基于风火打捆送端系统构建了包含10种典型运行工况的扰动测试集,参数配置见附录A表A2。其中前6组工况为训练阶段涉及的典型场景,后4组为训练未见工况。每种工况均叠加风速、负荷及同步机出力扰动,以模拟实际系统运行中的波动。

针对上述测试集, 本文分别对比了不同控制策略在多工况下的系统主导模态阻尼比分布。

如图 10 所示, 固定参数控制策略由于缺乏多控制器间的协同整定机制, 在工况 C5 下阻尼比跌至 1.37%, 甚至会恶化系统阻尼。PSO、DDPG 与 MADDPG 方法虽然可在一定程度上提升系统阻尼, 但在部分工况下阻尼比仍不足 5%, 难以满足实际运行的稳定性要求。相比之下, PCA-MADDPG 策略在所有工况中均能将主导模态阻尼比提升至 7.5%以上, 显著优于其他策略, 展现出良好的控制稳定性与鲁棒性。

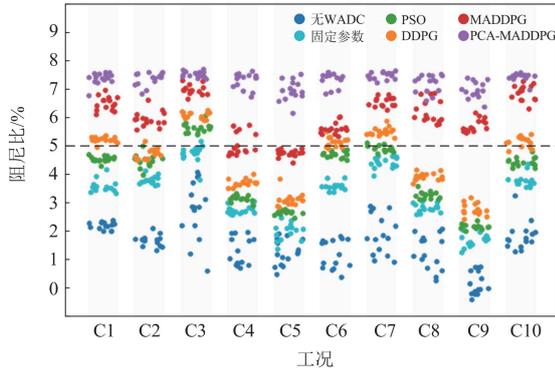


图 10 多运行工况下控制策略阻尼比对比

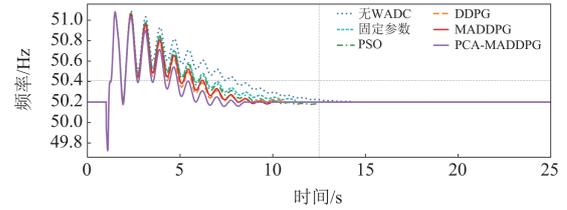
Fig. 10 Damping ratio comparison of control strategies across multiple operating scenarios

以工况 C7 为例验证所提策略在未见工况下的控制性能, 设定系统在 1.0 s 时母线发生三相短路故障, 故障持续 0.1 s 后清除。对比各控制策略下频率、有功功率及相对功角的时域响应。结果如图 11 所示。未引入 WADC 时, 系统频率、有功功率及相对功角均出现剧烈振荡且无法衰减; 固定参数 WADC、PSO、DDPG、MADDPG 及 PCA-MADDPG 方法将功角振荡收敛时间分别缩短至 18.43 s、15.87 s、14.36 s、11.21 s、9.12 s, 功角振荡幅度分别降低 12.51%、14.23%、17.87%、23.41%、27.12%。相比之下, 本文所提策略能够在故障发生后迅速抑制振荡, 展现出更优的控制效果。

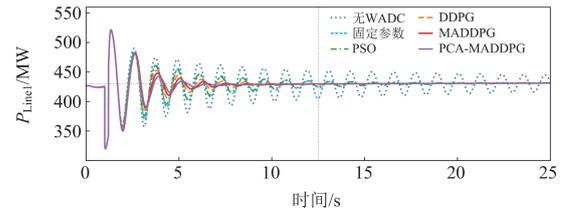
为验证所提策略对阻尼比的提升效果, 本文在模态层面对其进行了分析, 通过提取不同策略下的主导模态特征值并绘制分布图, 如图 12 所示。结果显示 PCA-MADDPG 策略可显著推动主导模态特征值实部远离虚轴, 并在未见工况中实现阻尼比提升 119.29%, 验证了其在复杂工况下的适用性。

综上, 本文所提 PCA-MADDPG 控制策略在高比例风电接入的复杂运行工况下, 均表现出良好的低频振荡抑制效果与鲁棒性, 验证了其在实际电网

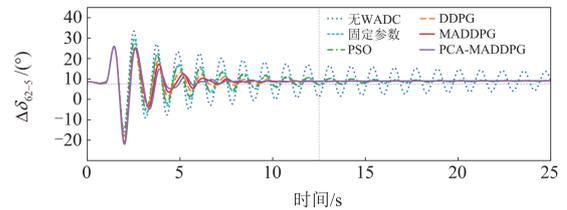
中的控制性能及工程应用价值。



(a) 频率响应



(b) 有功响应



(c) 相对功角

图 11 工况 C7 下不同控制策略响应对比图

Fig. 11 Response comparison under different control strategies in scenario C7

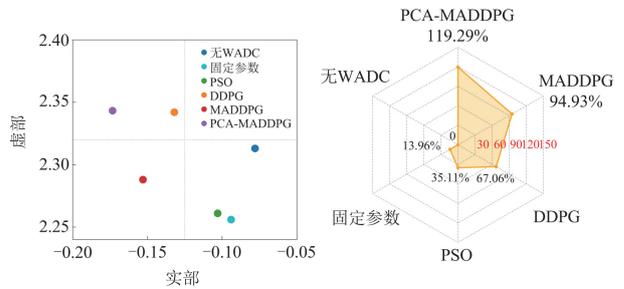


图 12 工况 C7 下主导模态特征值分布与阻尼特性对比

Fig. 12 Comparison of dominant mode eigenvalue distribution and damping characteristics in scenario C7

4 结论

本文针对高比例风电并网系统可能出现的低频振荡现象, 提出了一种融合 PCA 与 MADDPG 的智能广域阻尼协同控制策略, 用于抑制系统区域间低频振荡。通过仿真验证可得到以下结论。

1) 本文所提出的 PCA-MADDPG 控制策略通过对高维状态输入进行降维处理, 增强了控制策略在复杂工况下的学习能力与训练稳定性。

2) 本文构建的含风电电力系统的智能广域阻

尼协同控制策略通过多机 WADC 协同整定, 显著提升了区域间低频振荡模态的阻尼水平, 在复杂工况下均表现出良好的振荡抑制能力。

综上, 本文所提控制策略在改进的两区域四机系统和我国西北风火打捆送端系统的仿真分析中, 展现出良好的低频振荡抑制效果, 具备较强的工程应用潜力。未来的工作将进一步拓展其在线优化能力, 结合模态辨识与自适应控制机制, 以增强其在多运行场景下的区域间低频振荡抑制能力。

附录 A

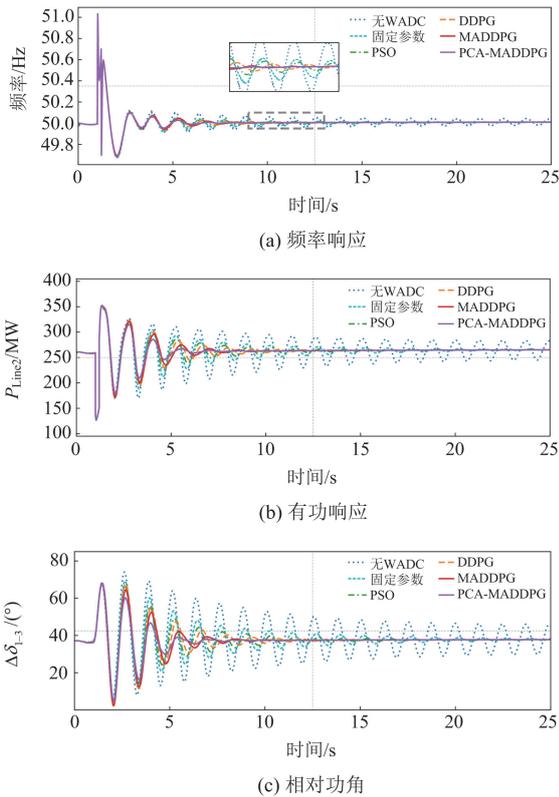


图 A1 20%风电渗透率下不同控制策略响应对比
Fig. A1 Comparison of system responses with different control strategies at 20% wind penetration

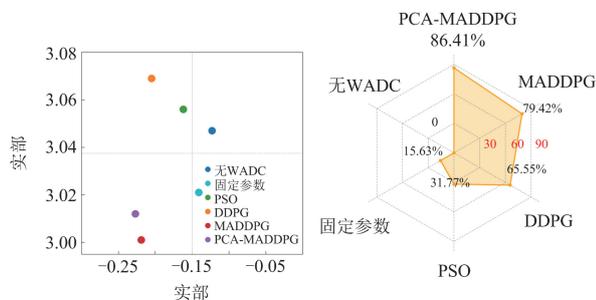


图 A2 20%风电渗透率下特征值分布与阻尼比提升对比
Fig. A2 Comparison of eigenvalue distribution and damping ratio increase at 20% wind penetration

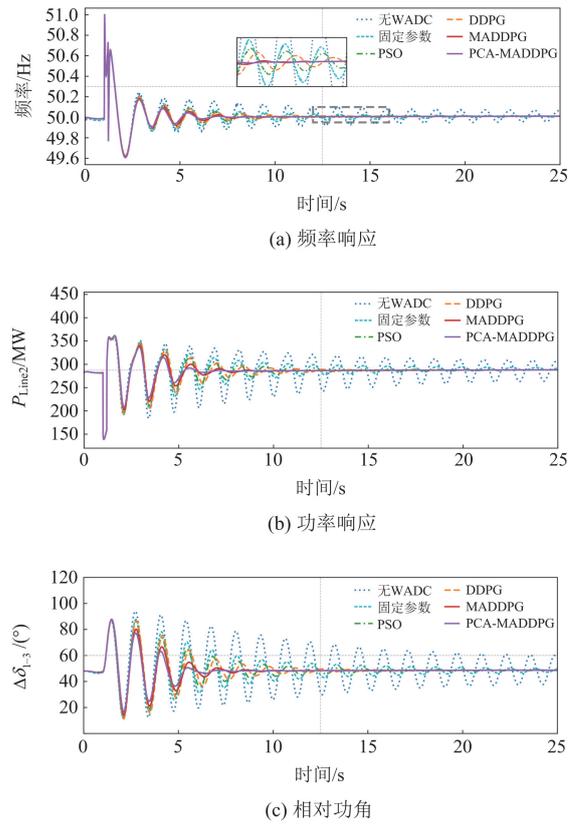


图 A3 60%风电渗透率下不同控制策略响应对比
Fig. A3 Comparison of system responses with different control strategies at 60% wind penetration

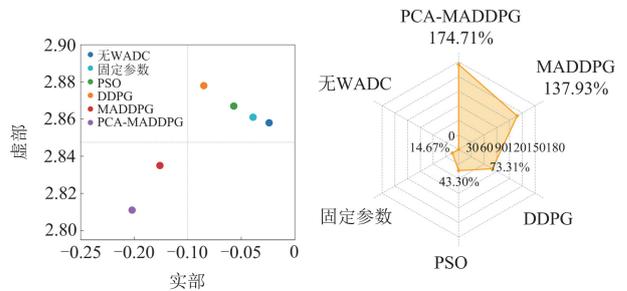


图 A4 60%风电渗透率下特征值分布与阻尼比提升对比
Fig. A4 Comparison of eigenvalue distribution and damping ratio increase at 60% wind penetration

表 A1 不同控制策略下参数优化结果

	G ₃			WF ₁		
	K ₁	T ₁	T ₃	K ₁	T ₁	T ₃
固定参数	40.00	0.50	0.05	40.00	0.50	0.05
PSO	46.23	0.43	0.02	44.41	0.37	0.04
DDPG	47.78	0.56	0.07	62.43	0.41	0.02
MADDPG	65.49	0.63	0.06	64.67	0.55	0.06
PCA-MADDPG	76.23	0.74	0.04	72.42	0.61	0.05

表 A2 多运行工况参数配置

Table A2 Parameter configuration of multiple operating scenarios

工况	场景 类型	风电 占比/%	风速水平/ (m/s)	Load1 水平/p.u.	Gen1A-4 状态
C1	训练场景	40	5	1.00	正常
C2	训练场景	50	6	0.75	正常
C3	训练场景	30	8	0.90	正常
C4	训练场景	40	12	0.80	正常
C5	训练场景	45	5	1.00	掉机
C6	训练场景	35	13	0.65	正常
C7	未见工况	20	4.5	1.00	正常
C8	未见工况	55	5.5	0.70	正常
C9	未见工况	40	14	1.00	掉机
C10	未见工况	25	13	0.85	正常

参考文献

- [1] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [2] 柯贤波, 孙谊娟, 任冲, 等. 弱联络条件下并网虚拟同步发电机小干扰稳定性分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 101-106.
KE Xianbo, SUN Yiqian, REN Chong, et al. Analysis of small-signal stability of grid-connected VSG under weak grid connection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 101-106.
- [3] 袁国富, 杜文娟, 王海风. 风机出力变化下直驱风电场小干扰稳定性分析[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 35-45.
YUAN Guofu, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis of small signal stability in direct-drive wind farm under wind power generation variations[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 35-45.
- [4] 孙浩宁, 王德林, 李京华. 基于转速差补偿环的双馈风机电网调频特性研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(8): 62-67.
SUN Haoning, WANG Delin, LI Jinghua. Study on characteristics of frequency regulation of DFIG based on D-value of rotor speed compensation loop in power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(8): 62-67.
- [5] 薛安成, 王清, 毕天姝. 双馈风机与同步机小扰动功角互作用机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 417-425.
XUE Ancheng, WANG Qing, BI Tianshu. Study on the mechanism of small signal dynamic interaction between doubly-fed induction generator and synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 417-425.
- [6] 吕健勇, 陈骁, 杜文娟. 并网双馈风电场直流电压时间尺度小干扰稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(12): 111-119.
LÜ Jianyong, CHEN Xiao, DU Wenjuan. A stability analysis of small disturbances in grid-connected doubly-fed wind farms with dc voltage time scales[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(12): 111-119.
- [7] 杨悦. 含大规模风电电网的互联电力系统低频振荡特性分析与控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
YANG Yue. Analysis and control of low-frequency oscillation characteristics in interconnected power systems with large-scale wind power integration[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [8] 舒印彪, 汤涌, 张正陵, 等. 欧洲伊比利亚半岛电网“4·28”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(17): 6603-6610.
SHU Yinbiao, TANG Yong, ZHANG Zhengling, et al. Analysis and lessons of the April 28, 2025 blackout in the Iberian Peninsula power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(17): 6603-6610.
- [9] DOMÍNGUEZ-GARCÍA J L, GOMIS-BELLMUNT O, BIANCHI F D, et al. Power oscillation damping supported by wind power: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 4994-5006.
- [10] HUGHES F M, ANAYA-LARA O, JENKINS N, et al. A power system stabilizer for DFIG-based wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 763-772.
- [11] 周镇, 孙近文, 曾凡涛, 等. 考虑风机接入的电力系统小信号稳定优化控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊1): 424-431.
ZHOU Zhen, SUN Jinwen, ZENG Fantao, et al. Optimal supplementary control for small signal stability of power system with DFIG integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 424-431.
- [12] NAVANEETH K, KOTIAN S M. Design of wide area controllers for synchronous generators[C] // 2024 International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences(ICSSSES), May 3-4, 2024, Tumakuru, India: 1-6.
- [13] 张子星, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于RBF的VSG虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 155-164.
ZHANG Zixing, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. VSG virtual inertia and dynamic damping compensation

- adaptive control based on RBF[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 155-164.
- [14] NAN J, YAO W, WEN J, et al. Wide-area power oscillation damper for DFIG-based wind farm with communication delay and packet dropout compensation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124.
- [15] 李生虎, 陈东, 叶剑桥, 等. 基于阻尼系数灵敏度的风光电网动态交互分析与稳定提升方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 150-161.
- LI Shenghu, CHEN Dong, YE Jianqiao, et al. Dynamic interaction analysis and stability improvement method for wind/PV integrated power systems based on damping coefficient sensitivity[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 150-161.
- [16] 聂永辉, 庄灿冰, 郭强, 等. 含风电互联系统的 SVC 附加双通道广域阻尼控制设计[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 125-135.
- NIE Yonghui, ZHUANG Canbing, GUO Qiang, et al. Design of SVC with additional two-channel wide-area damping control for wind power interconnection system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 125-135.
- [17] 聂永辉, 徐晗桐, 蔡国伟, 等. 含双馈风电机组系统的广域阻尼控制器协调优化策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 79-84.
- NIE Yonghui, XU Hantong, CAI Guowei, et al. Coordinated optimal strategy of wide-area damping controller in doubly-fed wind turbine system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 79-84.
- [18] 王永飞, 江琴, 李保宏, 等. 风储接入高比例水电系统超低频振荡抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 82-92.
- WANG Yongfei, JIANG Qin, LI Baohong, et al. Ultra-low-frequency oscillation suppression method in high-proportion hydro power systems with wind-storage integration[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 82-92.
- [19] ZHANG G, HU W, ZHAO J, et al. A novel deep reinforcement learning enabled multi-band PSS for multi-mode oscillation control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3794-3797.
- [20] SHEN Y, MA J, WANG L. Study on DFIG dissipation energy model and low-frequency oscillation mechanism considering the effect of PLL[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(4): 3348-3364.
- [21] 张辰, 柯德平, 孙元章. 双馈风电机组附加阻尼控制器与同步发电机 PSS 协调设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 30-37.
- ZHANG Chen, KE Deping, SUN Yuanzhang. Coordinative design for supplementary damping controller of doubly-fed induction generator and PSS of synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 30-37.
- [22] REIGSTAD T I, D'ARCO S, SANCHEZ-ACEVEDO S. An adaptive special protection scheme coordinating multiple generation units for damping power system natural oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2025, 40(1): 226-236.
- [23] ZHANG G, HU W, CAO D, et al. A data-driven approach for designing STATCOM additional damping controller for wind farms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117.
- [24] KUMAR A, BHADU M. Wide-area damping control system for large wind generation with multiple operational uncertainty[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213.
- [25] KURITA T. Principal component analysis (PCA)[M] // Computer Vision: A Reference Guide, Cham: Springer International Publishing, 2021: 1013-1016.
- [26] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [27] 陈刚, 程林, 孙元章, 等. 基于综合几何指标的广域电力系统稳定器设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 18-22.
- CHEN Gang, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Wide-area power system stabilizer design based on joint geometric index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 18-22.
- [28] 徐式蕴, 李宗翰, 赵兵, 等. 新型电力系统标准算例(一): 功角稳定[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5973-5984.
- XU Shiyun, LI Zonghan, ZHAO Bing, et al. Benchmark for AC-DC hybrid system with high penetration of renewables (I): rotor angle stability CSEE-RAS[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5973-5984.

收稿日期: 2025-07-17; 修回日期: 2025-09-24

作者简介:

孙正龙(1988—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新能源电力系统稳定与控制、人工智能在电力系统中的应用; E-mail: nedusunzl@ncepu.edu.cn

李慎浩(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统稳定与控制。E-mail: 2202300343@ncepu.edu.cn

(编辑 许威)