

基于储能的双馈风电场次同步振荡 模型-数据融合阻尼控制方法

许练楠¹, 黄玲玲^{1,2}, 吴晗¹, 郭雨龙¹

(1. 上海电力大学电气工程学部, 上海市 200090; 2. 海上风电技术教育部工程研究中心
(上海电力大学), 上海市 200090)

摘 要:【目的】随着双馈风电场经串补线路大规模并网, 机组与电网之间相互作用引发的次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)问题日益突出。现有的次同步阻尼控制器(sub-synchronous damping controller, SSDC)在适应性、鲁棒性方面存在局限, 难以应对复杂运行工况的变化。为提升系统对宽频带 SSO 的抑制效果, 提出了一种兼具高可靠性与强自适应能力的模型-数据融合阻尼控制方法。【方法】提出一种基于储能的模型-数据融合阻尼控制架构, 该架构将机理清晰的传统 SSDC 与基于无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)的 SSDC 相结合, 并借助同一网侧储能系统注入阻尼信号。传统 SSDC 提供基频附近的基础阻尼支撑, 基于 MFAC 的 SSDC 则实时跟踪系统动态并适应频率偏移, 从而避免多设备协调与复杂参数整定。【结果】在不同参数变化与大扰动故障等多种工况下, 相较于其构成单元, 所提控制器均能快速、平稳地抑制不同频率的 SSO, 且表现出更优的带宽适应性与动态调节性能。【结论】所构建的融合阻尼控制架构有效结合了固定结构的稳定性与数据驱动的灵活性, 结构简洁、易于实现, 在提升系统动态性能与鲁棒性方面具有显著效果。

关键词: 双馈风电场; 次同步振荡(SSO); 模型-数据融合; 储能; 无模型自适应控制(MFAC)

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)05-0185-12

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.05.015

Model-Data Integrated Damping Control for Sub-Synchronous Oscillations in Doubly-Fed Wind Farms With Energy Storage

XU Liannan¹, HUANG Lingling^{1,2}, WU Han¹, GUO Yulong¹

(1. Faculty of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Engineering Research Center of Offshore Wind Technology Ministry of Education
(Shanghai University of Electric Power), Shanghai 200090, China)

ABSTRACT: [Objective] With the large-scale integration of doubly-fed induction generator (DFIG) based wind farms via series-compensated transmission lines, the issue of sub-synchronous oscillation (SSO) induced by the interaction between units and the grid has become increasingly prominent. Existing sub-synchronous damping controllers (SSDC) face limitations in adaptability and robustness, making it difficult to cope with complex and varying operating conditions. To enhance the suppression of wide-band SSO, this paper proposes a model-data fusion damping control method featuring high reliability and strong adaptability. [Method] A model-data fusion damping control architecture based on energy storage is proposed. This architecture combines a mechanism-based traditional SSDC with a model-free adaptive control (MFAC) based SSDC, injecting damping signals via the same grid-side energy storage system. The traditional SSDC provides fundamental damping support near the fundamental frequency, while the MFAC-based SSDC tracks system dynamics in real-time and adapts to frequency deviations, thereby avoiding multi-device coordination and complex parameter tuning. [Results] Under various operating conditions, including parameter variations and large disturbance faults, the proposed controller can rapidly and smoothly suppress SSO at different frequencies compared to its constituent units. It demonstrates superior bandwidth adaptability and dynamic regulation performance. [Conclusions] The constructed fusion damping control architecture

effectively combines the stability of fixed structures with the flexibility of data-driven approaches. It features a concise structure and ease of implementation, showing significant effectiveness in improving system dynamic performance and robustness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52177097) and Shanghai Municipal Education Commission Natural Science Major Project (No. 2021-01-07-00-07-E00122).

KEYWORDS: double-fed wind farm; sub-synchronous oscillation (SSO); model-data fusion; energy storage; model-free adaptive control (MFAC)

0 引言

近年来,为实现“双碳”目标,风电作为清洁能源的核心组成部分,其装机容量在全球范围内持续提升^[1]。双馈感应发电机(double-fed induction generator, DFIG)因成本低、体积小且可实现变速恒频运行,已成为当前风电场主流机型之一^[2-3]。我国风资源与电力负荷中心呈逆向分布,风电需经远距离、大规模输电通道外送。为提高输送能力与系统稳定性,串联补偿技术被广泛采用^[4-5]。然而,在新能源与电力电子设备高比例接入形成的“双高”系统背景下^[6],当双馈风电场经串联补偿电容并网时,易引发次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)问题^[7-11]。因此,如何有效抑制 SSO 已成为保障新能源安全并网亟待解决的难题之一。

为有效抑制 SSO,现有研究主要围绕控制参数优化^[12-13]、机侧附加传统次同步阻尼控制器(traditional sub-synchronous damping controller, T-SSDC)^[14-16],以及加装柔性交流输电系统设备^[17-21]或储能^[22-23]三类措施进行。在控制参数优化方面,文献[12]通过特征值分析和实验仿真实证,通过调整转子侧变流器(rotor side converter, RSC)比例参数可有效抑制 SSO。该方法结构简单、调节便捷,但其参数可调节范围有限^[24]。在机侧附加 T-SSDC 方面,文献[15-16]基于阻抗模型分别设计了 RSC 与网侧变流器(grid-side converter, GSC)的 T-SSDC,通过重塑 DFIG 阻抗特性抑制 SSO。然而,随着风电场规模的不断扩大,该方法的工程实施难度与协调控制复杂度显著增加,可扩展性受限。在附加装置方面,文献[17-23]分别研究了采用静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)、静止无功发生器(static var generator, SVG)、混合型统一潮流控制器(hybrid unified power flow controller, HUPFC)和储能等装置抑制 SSO 的可行性。

然而,上述方法均依赖于系统的精确数学模型,属于基于模型的控制范畴。随着电力系统“双

高”特性日益凸显,基于模型的控制方法面临建模复杂度、模型失配导致性能下降以及泛化能力不足等挑战^[25-26]。为此,无需显式数学模型的数据驱动控制方法在 SSO 抑制中逐渐受到关注^[27-28]。文献[29]提出基于无模型自适应控制的次同步阻尼控制器(model free adaptive control-sub-synchronous oscillation damping controller, MFAC-SSDC),采用紧格式动态线性化(compact form dynamic linearization, CFDL)方法,通过伪偏导数(pseudo partial derivative, PPD)表征系统动态,进而实现自适应的 SSO 抑制。文献[30]则将 MFAC 框架应用于 STATCOM 的附加阻尼控制中,实现了基于网侧装置的多工况 SSO 抑制。但现有研究鲜有将 MFAC 应用于储能控制框架,以充分发挥其无模型自适应特性,并利用储能的快速功率调节能力,从而为双馈风电场提出一种高性能的 SSO 抑制方案。

值得关注的是,近年来一些研究开始探索协同控制策略^[31-35]。文献[31]在 RSC 与 GSC 的中嵌入准谐振控制器,有效抑制了次同步控制相互作用,但其在多机系统下的可扩展性存在局限。文献[32]提出了一种针对双馈风机与 SVG 的协同阻尼优化控制策略,显著增强了系统阻尼,但其频率适应性不足。文献[35]则提出了基于 MFAC 的多机协同阻尼控制策略,有效抑制了新能源场站的 SSO,但其协同效率与扩展性仍存在不足。这些研究呈现出从单机控制到多设备协同、从模型依赖到数据驱动的发展趋势,在提升系统稳定性的同时也暴露出适应性、复杂性与可扩展性等方面的问题。

针对现有研究的不足,本文以含储能的双馈风电场经串补并网系统为研究对象,在分析其 SSO 产生机理的基础上,提出一种基于储能的模型-数据融合阻尼控制器(model-data integrated damping controller, MDIDC)。该控制器在架构层面将机理清晰的 T-SSDC 与自适应能力强的 MFAC-SSDC 集成于同一网侧储能系统,实现硬件平台统一与信号通道复用;在功能层面, T-SSDC 提供基频附近的基础阻尼支撑, MFAC-SSDC 则实时跟踪

系统动态并自适应频率偏移,二者形成互补增强的宽频阻尼特性。本文的核心创新体现在以下三个方面:1)理论创新——首次将MFAC框架引入储能附加阻尼控制中,实现模型驱动与数据驱动的有机融合;2)协调机制创新——通过频域功能分工与灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO)协同整定,从设计源头解决指令冲突;3)工程实用性创新——充分利用储能自身功率调节能力,在不增加额外硬件投入的前提下,实现对宽频次同步振荡的有效抑制,具有良好的工程适用性与推广价值。

1 含储能的双馈风电场经串补并网系统架构及其SSO原理

1.1 含储能的双馈风电场经串补并网系统架构

本文所提 MDIDC 的融合控制架构如图 1 所示,其含储能的双馈风电场经串补并网的典型系统结构及其传统控制方式。该系统由 DFIG、箱式变压器、风电场升压变压器、风电场集电线路、储能系统和串联补偿线路组成。系统传统控制中 RSC 采用定有功功率与无功功率控制,用以实现风机最大功率跟踪控制, GSC 采用定直流电压与无功功率控制,用以稳定系直流母线电压,并支撑并网点交流电压水平,储能逆变器采用定直流

电压与定交流电压控制,用以稳定并网点交流电压。图中物理量含义说明详见附录表 A1。

1.2 SSO 原理

在含储能的双馈风电场经串补并网系统中,SSO 的产生源于系统在特定频段呈现的负阻尼特性,可通过次同步频率下的等效电路进行分析。

转差率 s 定义为:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad (1)$$

式中: ω_s 为同步角速度; ω_e 为扰动对应的角速度。

当系统受到频率 f_e (低于同步频率 f_s) 的次同步扰动时,对应 $s > 0$ 。此时,串联补偿电容与线路电感形成的谐振回路若其固有谐振频率 $f_n = f_s - f_e$, 则次同步分量会在转子侧感应出频率为 f_n 的电流。此时相对于转子转速 ω_r , 该感应电流对应的 s 为负,导致映射至定子侧的转子等效电阻为负值。

当该负电阻的绝对值超过定子侧及线路等正阻尼之和时,系统在频率 f_e 附近将形成负阻尼,扰动能量无法耗散,从而引发 SSO。

在含储能的双馈风电场经串补并网系统中,储能作为系统的固有组成部分,其基础控制功能已在初始运行状态中得以体现。在未投入附加阻尼控制前,储能主要承担并网点电压支撑作用,其对 SSO 产生机理的定性分析不构成实质性影响。本文所提出的 MDIDC 正是利用储能系统的快速功

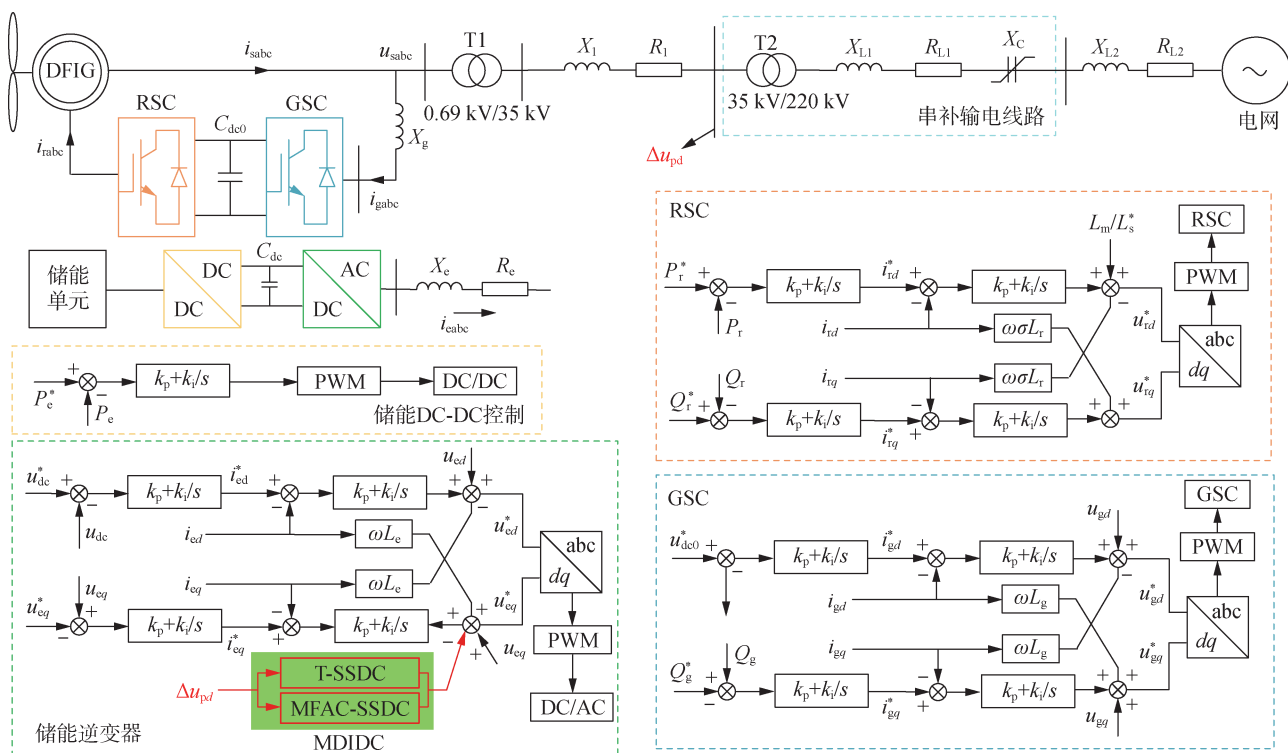


图1 含储能的双馈风电场经串补并网系统电路及其传统控制方案

Fig. 1 Circuit of doubly-fed wind farm with energy storage and its traditional control scheme

率调节能力,通过在次同步频段主动重塑系统阻抗特性,提供正阻尼以实现 SSO 的有效抑制。

2 MDIDC 设计

本文所提 MDIDC 的融合控制架构(见图 1)以接入风电场公共连接点的储能系统为统一执行平台,充分利用其快速功率调节能力与充足容量,为阻尼控制提供理想的物理载体。T-SSDC 与 MFAC-SSDC 并联接入附加阻尼控制回路,二者以风电场公共连接点电压 d 轴分量波动量为共同输入信号,其输出经协调叠加后共同作用于储能变流器无功电流内环的参考值,使储能能在次同步频段主动输出阻尼功率,通过重塑系统阻抗特性实现对 SSO 的有效抑制。

2.1 T-SSDC 的设计

T-SSDC 基于线性相位补偿原理向储能控制回路注入附加阻尼信号,以增强系统对 SSO 的抑制能力。该控制器主要由滤波、比例-移相和限幅三个环节串联构成。T-SSDC 控制结构如图 2 所示。

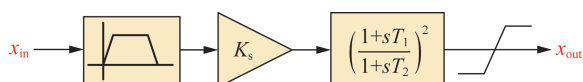


图 2 T-SSDC 结构图

Fig. 2 T-SSDC architecture diagram

2.1.1 滤波环节

为准确提取 SSO 频率分量,本文选取二阶带通滤波器作为信号预处理环节。其传递函数可表示为:

$$G_f(s) = \frac{2\xi_s \omega_c s}{s^2 + 2\xi_s \omega_c s + \omega_c^2} \quad (2)$$

式中: ω_c 为滤波器的中心角频率; ξ_s 为滤波器的阻尼比。

2.1.2 比例-移相环节设计

比例-移相环节的作用是根据系统振荡的相位特性,生成具有合适相位的储能功率调制指令,以抵消 SSO。该环节的传递函数通常采用如下超前-滞后形式:

$$H(s) = K_s \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right)^2 \quad (3)$$

式中: K_s 为增益参数; T_1 、 T_2 分别为超前与滞后时间常数。

2.1.3 限幅环节设计

限幅环节用于约束储能内环附加阻尼信号的幅值,防止因输出过大引起控制器饱和或诱发非线性失稳。本文将限幅值设为内环电流参考信号的 $\pm 5\%$,可在确保阻尼效果的同时,避免过调制,

兼顾控制有效性与系统安全性。

2.2 MFAC-SSDC 的设计

在 MFAC-SSDC 设计中,常将含储能的双馈风电场并网系统简化为单输入单输出(single-input single-output, SISO)结构,以降低多变量耦合对控制策略设计的复杂性。结合实际电力系统的离散采样与非线性动态特性,该系统可描述为如下 SISO 离散时间非线性模型:

$$y(k+1) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), x(k), x(k-1), \dots, x(k-n_x)] + \delta(k) \quad (4)$$

式中: $x(k) \in \mathbf{R}$ 、 $y(k) \in \mathbf{R}$ 分别表示 k 时刻系统的输入和输出; n_x 、 n_y 分别表示输入与输出的历史步数; $f(\cdot) \in \prod_{n_y+1} \mathbf{R} \times \prod_{n_x+1} \mathbf{R} \mapsto \mathbf{R}$ 为未知的非线性函数; $\delta(k)$

表示未知扰动。

在进行阻尼控制器设计前,需做出如下假设:

假设 1:除有限时刻点外,函数 $f(\cdot)$ 关于第 n_y+2 个变量的偏导数是连续的。

假设 2:除有限时刻点外,系统式(4)满足广义 Lipschitz 条件,即对任意 $k_1 \neq k_2$, $k_1, k_2 \geq 0$ 且 $x(k_1) \neq x(k_2)$,有:

$$|y(k_1+1) - y(k_2+1)| \leq b |x(k_1) - x(k_2)| \quad (5)$$

式中: b 为一个大于 0 的常数; k_1 、 k_2 代表任意两个时刻。

定理:对满足假设 1 和假设 2 的非线性系统式(4),当 $|\Delta x(k)| \neq 0$ 时,总存在一个有界的 PPD $\phi_e(k) \in \mathbf{R}$,使得系统可转化为式(6)的 CFDL 数据模型。

$$\Delta y(k+1) = \phi_e(k) \Delta x(k) + \Delta \delta(k) \quad (6)$$

式中: $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$ 表示输出增量; $\Delta x(k) = x(k) - x(k-1)$ 表示输入增量; $\Delta \delta(k) = \delta(k) - \delta(k-1)$ 表示误差增量,且 $|\Delta \delta(k)| \leq 2D$,其中常数 $D > 0$ 表示 $\delta(k)$ 的限值。

本文提出的控制系统主要包括两个核心部分。1) PPD 估计算法:为解决被控系统模型未知的问题,利用动态线性化技术将原非线性系统转换为 CFDL 数据模型,并依据实时输入/输出数据的局部差分信息在线更新 PPD 估计值;2) 控制算法:通过构建适用于模型-数据融合阻尼控制的加权一步前向预测误差准则函数,并采用投影算法实时求解最优控制量。

2.2.1 PPD 估计算法

为了对 PPD 估计值进行迭代计算,建立如下基于 CFDL 格式的系统输出估计模型:

$$\hat{y}(k+1) = \hat{y}(k) + \hat{\phi}_c(k)\Delta x(k) + \theta\tilde{e}(k) \quad (7)$$

式中: $\hat{y}(k)$ 表示系统输出信号的估计值; $\tilde{e}(k) = y(k) - \hat{y}(k)$ 表示估计输出误差; $\theta \in (0, 1)$ 表示输出误差增益。

为提高 PPD 估计的鲁棒性, 本文采用如下 PPD 估计准则函数:

$$J[\phi_c(k)] = |y(k) - \hat{y}(k)|^2 + \mu |\phi_c(k) - \hat{\phi}_c(k-1)|^2 \quad (8)$$

式中: $\mu > 0$ 为权重因子, 用于限制 PPD 估计值的剧烈变化。

对式(8)关于 $\phi_c(k)$ 求极值, 令其导数为 0, 可得参数递推估计算法如下:

$$\hat{\phi}_c(k+1) = \hat{\phi}_c(k) + \frac{\eta\Delta x(k)}{\mu + \Delta x(k)^2} [\tilde{e}(k+1) - \theta\tilde{e}(k)] \quad (9)$$

式中: $\hat{\phi}_c(k)$ 表示 $\phi_c(k)$ 的估计值; $\eta \in (0, 2]$ 为步长因子; $\theta = 1 - \theta$, $\theta \in (0, 1)$ 。

2.2.2 控制算法

针对现有 MFAC 准则直接应用于 SSO 抑制存在两点局限: 其一, SSO 为暂态现象, 原准则以稳态跟踪为目标, 系统恢复后持续输出阻尼信号可能干扰储能正常运行甚至诱发新失稳; 其二, 附加阻尼控制需遵循“按需投入、适时退出”原则, 原准则缺乏相应退出机制。为此, 本文提出改进准则函数:

$$J[x(k)] = |y^*(k+1) - \hat{y}(k+1)|^2 + \lambda |x(k)|^2 \quad (10)$$

该准则函数由两项构成: 输出误差项驱动控制器在振荡期间主动抑制误差; 控制输入惩罚项限制控制量剧烈变化。系统趋于稳定时, 输出误差趋近于零, 准则函数由惩罚项主导。为最小化准则函数, 控制输入 $x(k)$ 自动趋于零, 实现阻尼控制的自然退出, 避免稳态下输出多余控制信号。该设计通过优化目标的内在平衡实现“适时退出”, 赋予控制律自适应性与平滑性。

对式(10)关于 $x(k)$ 求极值, 并应用矩阵求逆引理, 可得改进后的控制律为:

$$x(k) = \rho_1 \frac{\hat{\phi}_c(k)^2}{\lambda + \hat{\phi}_c(k)^2} x(k-1) + \rho_0 \frac{\hat{\phi}_c(k)}{\lambda + \hat{\phi}_c(k)^2} \cdot [y^*(k+1) - \hat{y}(k) - \xi\tilde{e}(k)] \quad (11)$$

式中: ρ_0, ρ_1 均为步长因子, $\rho_0, \rho_1 \in (0, 1]$ 。

考虑到 PPD 的时变特性, 为提升估计器对系统动态的跟踪能力, 引入重置机制:

$$\hat{\phi}_c(k) = \hat{\phi}_c(1), |\hat{\phi}_c(k)| < \varepsilon \text{ 或}$$

$$\text{sign}[\hat{\phi}_c(k)] \neq \text{sign}[\hat{\phi}_c(1)] \quad (12)$$

MFAC 的理论推导基于广义 Lipschitz 条件和 PPD 有界性假设, 在含电力电子变流器及限幅环节的实际系统中, 极端工况可能短暂破坏假设的严格成立性。为此, 本文通过两方面保障算法的鲁棒性: 1) PPD 重置机制(式(12))在估计值异常时将其重置, 等效于投影保护, 确保参数始终有界; 2) T-SSDC 的输出限幅间接约束了 MFAC-SSDC 的控制量幅值, 避免过大信号反作用于估计回路。

由式(7)、式(9)及式(11)共同构成 MFAC-SSDC 的完整算法, 其控制系统结构如图 3 所示。

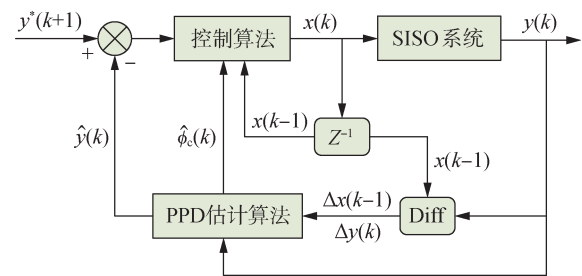


图3 MFAC-SSDC系统结构示意图

Fig. 3 Structure of the proposed MFAC-SSDC

3 参数优化

模型-数据融合阻尼控制策略中, T-SSDC 与 MFAC-SSDC 结构复杂、参数众多, 且系统动态呈现强非线性, 导致其参数优化设计面临显著困难。

针对多变量、非线性优化问题, 多种智能优化算法已被引入本领域。其中, GWO 算法因其较强的全局搜索能力与鲁棒性而受到关注^[36]。研究表明, 相较于粒子群算法和遗传算法, GWO 在收敛速度、避免局部最优方面具有显著优势, 能够更有效地处理多参数耦合、强非线性的优化问题^[37]。因此, 本文选用 GWO 算法进行 MDIDC 参数整定。

3.1 适应度函数

控制器参数优化常采用基于动态性能指标的适应度函数进行寻优^[38-39]。针对模型-数据融合阻尼控制策略的时变特性, 本文选取积分时间平方误差(integral of time multiplied by squared error, ITSE)作为优化目标函数。该指标通过对后期误差施加较大权重, 能够有效加速振荡收敛, 且计算简便, 相较于绝对误差积分(integral of absolute error, IAE)、时间乘绝对误差积分(integral of time multiplied by absolute error, ITAE)或阻尼比约束更具优势。其数学表达式为:

$$\min J_{ITSE} = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (13)$$

式中: $e(t)$ 表示 MDIDC 的输出跟踪误差。

3.2 参数优化步骤

基于 GWO 算法的 MDIDC 参数优化流程如图 4 所示,具体步骤如下。

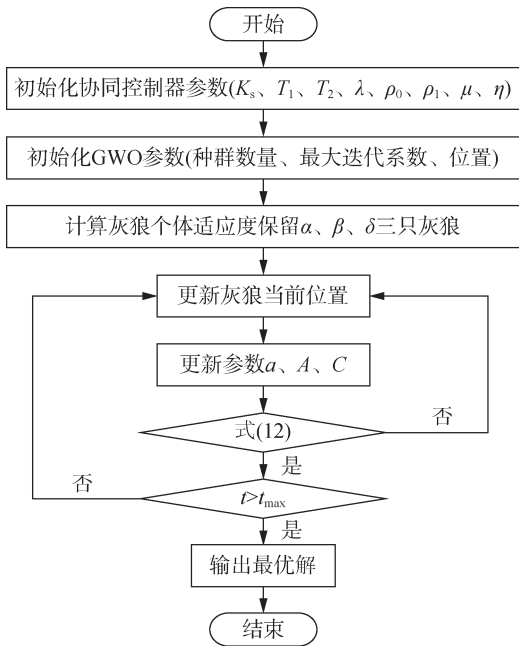


图 4 GWO 算法优化 MDIDC 参数流程图

Fig. 4 Flow chart of GWO algorithm for optimizing parameters of MDIDC

步骤 1:初始化控制器参数,MDIDC 参数初始值的选取直接影响优化效率与最终控制性能,其基本设置原则如表 1 所示。

表 1 MDIDC 参数及功能描述

Table 1 Parameters of MDIDC and functional descriptions

所属部分	参数	定义及作用关系
T-SSDC	K_s	增益系数:为阻尼回路提供基准放大倍数,是设定其他参数优化范围的参考基准。
	T_1, T_2	时间常数:用于调整阻尼控制信号的相位,使其在 SSO 频率处提供有效的正阻尼。
MFAC-SSDC	λ	惩罚因子:权衡控制输入变化与系统跟踪误差,抑制控制量剧烈波动。
	ρ_0, ρ_1	步长因子:共同决定 PPD 与控制量的更新速率,影响收敛性与稳定性。
	μ	权重因子:调节新旧数据在估计中的权重,影响参数估计的灵敏度与算法鲁棒性。
	η	平滑因子:抑制 PPD 估计值的剧烈波动,使参数更新过程更为平缓
	$\hat{\phi}_c(1)$	PPD 初始值:算法迭代起点,影响初期的学习速率,平衡收敛速度与抗扰性

各参数的搜索边界根据表 1 的物理意义及工程经验确定: $K_s \in [1, 10\ 000]$; $T_1, T_2 \in [0.01, 1]$; $\lambda \in$

$[0.1, 100]$; $\rho_0, \rho_1 \in (0, 1]$; $\mu \in [0.1, 2]$; $\eta \in (0, 2]$; $\hat{\phi}_c(1) \in [-2, 2]$ 。

针对 T-SSDC 部分,本文将参数设计建模为一个多工况阻尼协调优化问题:

$$\begin{cases} \max Z = \sum \min \{ \xi_j, j = 1, 2, \dots, k \} \\ \text{s.t.} \quad K_{s, \min} \leq K_s \leq K_{s, \max} \\ T_{i, \min} \leq T_i \leq T_{i, \max}, \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: ξ_j 为第 j 种工况下系统的主导模态阻尼比; $K_{s, \min}, K_{s, \max}$ 为增益系数的上下限; $T_{i, \min}, T_{i, \max}$ 为时间常数的上下限。

MFAC-SSDC 各参数需满足约束范围如下:

$$\begin{cases} \lambda > 0 \\ 0 < \rho_0, \rho_1 \leq 1 \\ \mu > 0 \\ 0 < \eta \leq 2 \\ \hat{\phi}_c > 0 \end{cases} \quad (15)$$

步骤 2:初始化 GWO 参数,包括种群规模 $N_t=30$ 、最大迭代次数 $t_{\max}=50$,以及算法核心参数 a, A, C 。初始种群在边界内均匀随机生成。

步骤 3:适应度评估。基于 ITSE 指标计算种群中每个个体的适应度值,识别并保留适应度最优的 3 只灰狼,分别记为 α, β, δ ,代表当前全局最优解、次优解和第三最优解。

步骤 4:位置更新。根据 α, β, δ 狼的位置信息,按 GWO 机制更新其他灰狼的当前位置,即更新控制器参数候选解。

步骤 5:参数更新。按如下规则更新算法参数 a, A, C 。

$$a = 2 \left(1 - \frac{t}{t_{\max}} \right), A = 2ar_1 - a, C = 2r_2 \quad (16)$$

式中: t 为当前迭代次数; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数。

步骤 6:约束判断。判断更新后的参数是否满足式(14)与式(15),若满足则进入下一步判断,若不满足则跳到步骤 4。

步骤 7:重复步骤 3—步骤 6 直至达到最大迭代次数。为避免随机性影响,独立运行 5 次优化,取其中最优适应度对应的参数作为最终整定结果。

4 算例分析

为评估本文所提 MDIDC 的性能,本节在 PSCAD/EMTDC 中搭建了与图 1 相同的含储能的双馈风电场经串补并网系统模型。其中,风电场由 100 台额定容量为 5 MW 的 DFIG 组成,各机组通过 0.69 kV/35 kV 箱变升压后接入 35 kV 母线,再经

35 kV/220 kV 主变压器升压,通过 220 kV 输电线路及串联补偿电容接入 220 kV 电网。额定容量为 100/200 MWh 为储能系统经 35 kV 母线接入,其结构包括电池组、DC/AC 换流器、无源电感滤波器及升压耦合变压器。该系统具体参数详见附录表 A2 和 A3。

本文通过以下四个场景验证所提 MDIDC 的性能:首先,以串补度实时变化为例,验证 MDIDC 在运行工况实时变化的场景下 SSO 抑制的有效性与适应性;其次,对单一参数变化下测试 SSO 抑制效果,以验证所提控制器的有效性与适应性;然后,在多种参数耦合变化场景中对 T-SSDC、MFAC-SSDC 与 MDIDC 对 SSO 的抑制效果,检验 MDIDC 的鲁棒性和宽频带适应性;最后,进行故障工况下的大扰动测试,进一步评估该控制器在暂态过程中的振荡抑制能力。

4.1 连续时变工况下自适应能力验证

首先,选取风电场的基本运行方式,对不同串补度下,MDIDC 与无附加阻尼控制两种方式进行仿真分析。具体在 $t=3$ s 时,投入 35% 的固定串补电容,然后分别于 $t=5$ s 和 $t=7$ s 时,将串补度提高至 50% 和 65%。此时,该双馈风电场并网有功功率波形如图 5 所示。

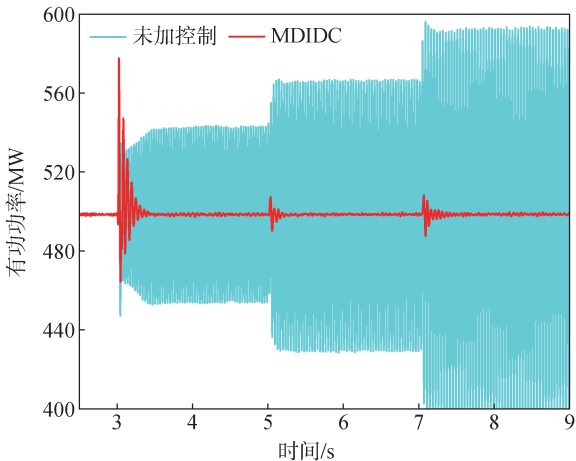


图 5 串补度实时变化时 MDIDC 抑制效果

Fig. 5 Effect of MDIDC on suppression when the series compensation degree changes in real time

由图 5 可以看出,随着系统串补水平的变化,风电场并网点处均激发 SSO,且振荡幅值随串补度提高而逐步加剧。相比无附加阻尼控制,投入本文所提 MDIDC 后,系统均可迅速平息 SSO。由此表明,本文所提的 MDIDC 能够在运行工况连续变化的场景下,实现对 SSO 的快速、平稳抑制。

4.2 单参数变化下 MDIDC 的有效性验证

为验证本文所提抑制策略的有效性,本节将对对比分析未加控制、T-SSDC、MFAC-SSDC 以及

MDIDC 对风电场输出功率振荡的抑制效果。风电场参数设置如表 2 所示,其中基础工况对应系统初始配置,工况一至工况六依次改变串补度 K_c 、短路比 SCR、风速 v_{wind} 、控制参数 (K_p , T_i) 及风电场数量 N ,以考察各参数变化对 SSO 特性的影响。

表 2 各运行工况的参数设定及其振荡频率

Table 2 Parameter settings for each operating condition and their oscillation frequencies

工况	$K_c/\%$	SCR	$v_{wind}/(\text{m/s})$	K_p	T_i	N	振荡频率/Hz
基础	20	1.5	11	2	0.05	100	34.997
一	50	1.5	11	2	0.05	100	28.497
二	20	3	11	2	0.05	100	32.997
三	20	1.5	8	2	0.05	100	30.497
四	20	1.5	11	4	0.05	100	33.997
五	20	1.5	11	2	0.01	100	30.997
六	20	1.5	11	2	0.05	30	37.496

对各工况下风电场输出有功功率进行傅里叶分析表明,在工况六与工况一下,系统 SSO 主导频率分别为 37.496、28.497 Hz,相差约 9 Hz。这说明 SSO 频率随运行条件变化会发生显著偏移,因此要求控制器必须具备良好的带宽适应性与参数鲁棒性。

图 6 仿真结果显示,在所述六种工况下,T-SSDC、MFAC-SSDC 与 MDIDC 均能实现 SSO 的有效抑制,使系统有功功率恢复至稳定运行值。然而,进一步对比动态调节过程可发现,T-SSDC 与 MFAC-SSDC 在收敛速度与超调量方面仍存在不足。MDIDC 在动态过程中表现出更快的收敛特性和更平稳的功率曲线,其输出功率在 $t=3.5$ s 后稳定过渡至较低水平,显示出优异的暂态抑制与稳定能力。相比之下,T-SSDC 与 MFAC-SSDC 虽最终可使系统稳定运行,但其调节过程中存在较明显的超调与振荡,动态响应速度相对滞后。

4.3 多参数耦合变化下 MDIDC 的鲁棒性与宽频抑制性能分析

为进一步验证所提 MDIDC 对 SSO 抑制的鲁棒性与宽频抑制性能,本节在多参数耦合变化场景下,对比分析 T-SSDC、MFAC-SSDC 及 MDIDC 的抑制效果。

首先,针对我国风电场分期建设导致机组数量与线路结构可能变化的情况,工况七中将风电机台数增至 150 台、串补度提升至 55%。此时系统振荡频率降至约 26.497 Hz,表明系统惯性增大与串补增强促使振荡模式向低频迁移。其次,为探究控制器参数的影响,在工况八中将比例增益 K_p

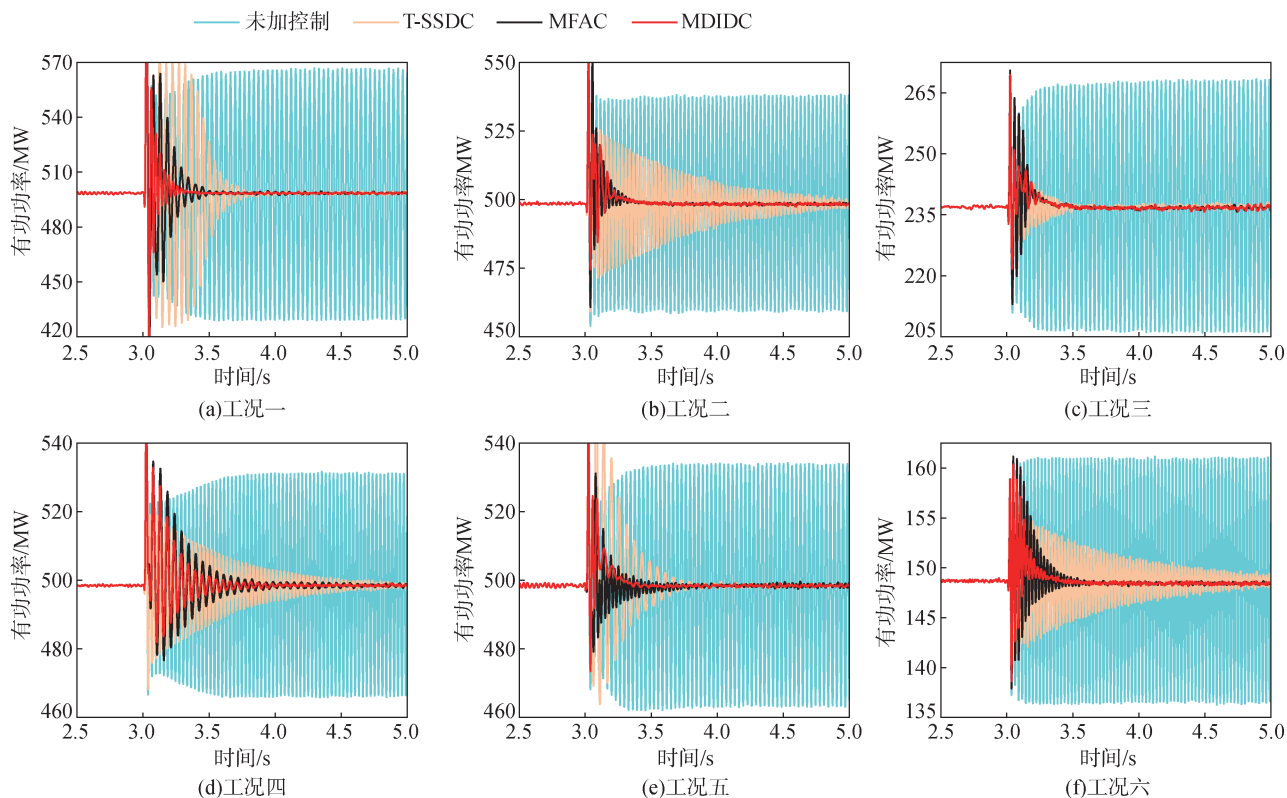


图 6 单一参数变化工况下SSO抑制效果对比

Fig. 6 Comparison of SSO suppression effect under single parameter change condition

提高至 4、 v_{wind} 降至 8 m/s, 系统振荡频率升至 38.997 Hz, 说明较低风速与较高增益共同作用, 使主导振荡频率向高频段偏移。此外, 工况九中 ($\text{SCR}=4, N=50$), 系统仍出现 36.496 Hz 的 SSO, 表明仅增强电网强度未能完全抑制振荡, 进一步揭示了控制器参数与电网条件之间存在的复杂耦合关系。各工况的仿真结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 在三种多参数耦合工况下, T-SSDC 均无法有效衰减振荡, 阻尼作用基本失效, 说明其在应对大规模参数变化时适应性不足。相比之下, MFAC-SSDC 凭借其无模型自适应特性, 表现出更好的带宽适应性与动态调节能力。然而, 进一步对比 MFAC-SSDC 与 MDIDC 可知, 后者在收敛速度与超调量两方面均表现更优, 在各类工况下均能更快、更平稳地抑制振荡。

4.4 大扰动下抑制策略有效性验证

考虑到双馈风电场实际运行环境复杂, 除面临系统参数不确定外, 还需承受短路、切机等大扰动冲击。为验证控制策略在暂态过程中的有效性, 本节选取三相短路、单相短路以及风电机组脱网三种典型场景, 分析 MDIDC 对 SSO 的抑制效果。

仿真设置如下: K_c 为 35%, 在 $t=3$ s 时固定投入; $t=5$ s 时, T2 低压侧发生三相接地短路故障, 持续 50 ms 后切除; $t=7$ s 时, 同一位置发生单相接地

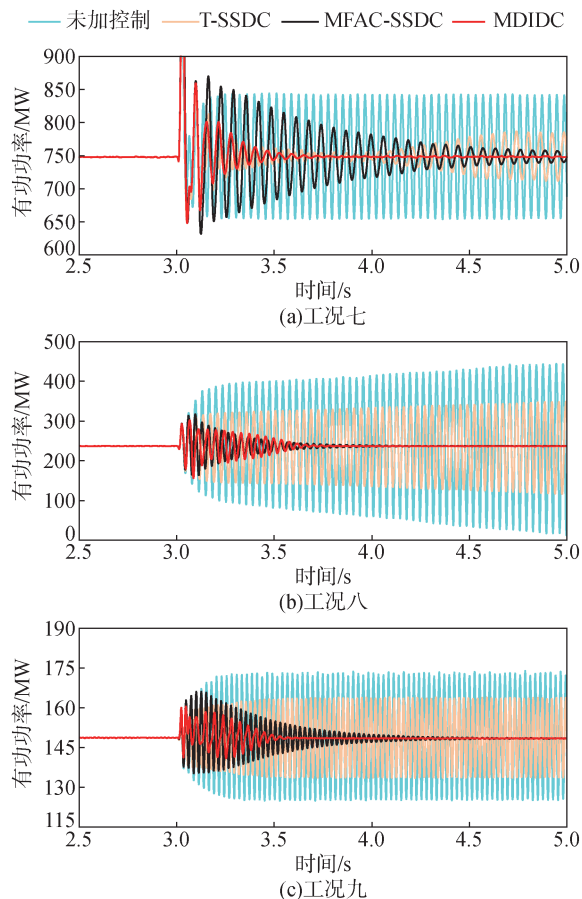


图 7 多参数耦合变化工况下,SSO抑制效果对比

Fig. 7 Comparison of SSO inhibition effect under multi-parameter coupled change condition

短路故障(A相接地),持续50 ms后切除; $t=9$ s时,风机群2发生脱网。风电场接线图与故障位置分布如图8所示,大扰动下测量点M的有功功率波形如图9所示。

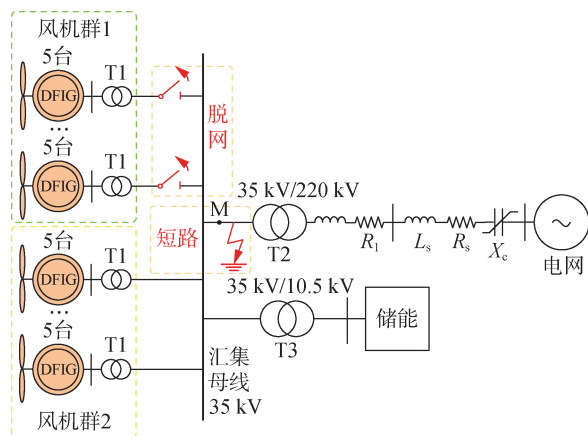


图8 风电场接线与故障位置分布

Fig. 8 Wind farm wiring and fault location distribution diagram

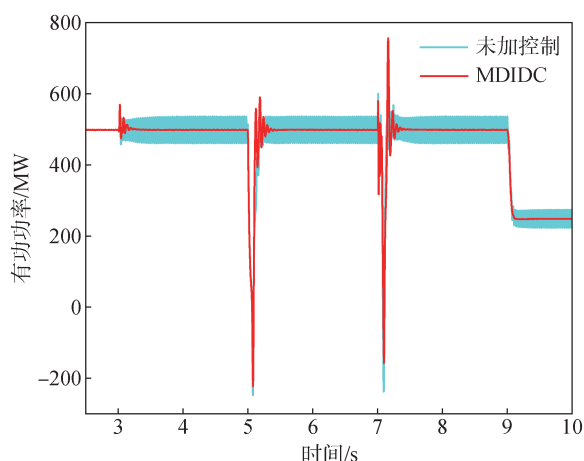


图9 大扰动下M测量点的有功功率波形

Fig. 9 Active power waveform of M measurement point under large disturbance

从图9仿真结果可知,相比未加控制的持续振荡,投入MDIDC后,由短路故障和机组脱网引发的SSO均可被迅速抑制,验证了该控制器在大扰动工况下仍具有良好的暂态抑制能力。

综合连续时变、参数变化及大扰动等多种工况下的仿真结果可知,相较于T-SSDC和MFAC-SSDC,本文所提MDIDC具有良好的带宽适应性与鲁棒性,且未出现因指令冲突所导致的控制失效或振荡复现。该优异性能归因于MDIDC内蕴的多重协调机制:首先,二者在频域上形成功能互补,T-SSDC专注于基频附近的基础阻尼,MFAC-SSDC则自适应补偿频率偏移;其次,通过GWO算法对二者参数进行协同整定,确保了联合作用下的整体最优;此外,线性叠加方式本身具有平滑滤波特

性,有效避免了指令冲突可能引发的阶跃突变。

5 结论

本文针对含储能的双馈风电场经串补并网系统的SSO抑制问题,提出了一种基于单一网侧储能的MDIDC。该控制器在架构层面将T-SSDC与MFAC-SSDC集成于同一储能平台,在功能层面实现固定结构支撑与自适应调节的互补增强,从而在统一架构下实现了机理清晰性与动态适应性的优势互补。基于PSCAD/EMTDC的仿真结果表明,在不同参数变化与大扰动场景下,MDIDC均能快速识别并抑制不同频段的SSO,相较于其构成单元,展现出良好的带宽适应性与鲁棒性,为含高比例新能源电力系统的SSO抑制提供了一种有效的控制解决方案。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明(Authors' Contributions):

许练楠提出了模型-数据融合控制框架,完成实验并分析数据,参与起草论文、修订论文;黄玲玲参与论文的修改和审核;吴晗收集数据;郭雨龙进行文献调研与整理。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

- [1] 孙东阳, 钱梓杰, 曹骏, 等. 基于哈密顿模型的DFIG强迫型次同步振荡自适应抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 3132-3146.
SUN Dongyang, QIAN Zijie, CAO Jun, et al. Adaptive suppression strategy research of DFIG forced subsynchronous oscillation based on Hamiltonian model [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 3132-3146.
- [2] 刘一琦, 黄旭, 王天昊, 等. 基于线性自抗扰控制的统一潮流控制器次同步振荡抑制策略[J]. 电力建设, 2025, 46(2): 151-159.
LIU Yiqi, HUANG Xu, WANG Tianhao, et al. UPFC subsynchronous oscillation suppression strategy based on linear active disturbance rejection control [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(2): 151-159.
- [3] 邢法财, 武诚, 蒋哲, 等. 计及网络谐振结构的双馈风电场次同步振荡问题分析及抑制[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 126-132.
XING Facai, WU Cheng, JIANG Zhe, et al. Analysis and suppression on sub-synchronous oscillation problems of DFIG-based wind farm considering network resonance structure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 126-132.
- [4] 赵永光, 艾力西尔·亚尔买买提, 汤波, 等. 串补电容对锁相环主导下变流器振荡问题的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6): 102-109.
ZHAO Yongguang, YAERMAIMAITI Ailixier, TANG Bo, et al. Analysis of influence of series complement capacitor on converter oscillation dominated by phase locked loop [J]. Electric Power

- Automation Equipment, 2024, 44(6): 102-109.
- [5] 赵崇滨, 陈骁, 徐飞阳, 等. 电力系统振荡问题: 生产运行的挑战与应对[J]. 电网技术, 2025, 38(1): 1-11.
- ZHAO Chongbin, CHEN Xiao, XU Feiyang, et al. Power system oscillation issues: operational challenges and countermeasures [J]. Power System Technology, 2025, 38(1): 1-11.
- [6] 狄依容, 甄永赞, 胡永强. 基于扩展PID控制的次同步振荡附加阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 2865-2875.
- DI Yirong, ZHEN Yongzan, HU Yongqiang. Additional sub-synchronous damping control method based on generalized PID control [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 2865-2875.
- [7] LI Y J, HUP F, QIAN L Q, et al. Decentralized sub-synchronous oscillation suppression controller for DFIG-based wind farms using periodic updating data-enabled predictive control approach [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2025, 13(6): 2002-2013.
- [8] JOSEPH T, UGALDE-LOOCE, BALASUBRAMANIAM S, et al. Experimental validation of an active wideband SSR damping scheme for series-compensated networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 58-70.
- [9] 杜程茂, 杜雄, 苏婧媛, 等. 定子电流控制的双馈风机导纳建模与次同步振荡风险分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(13): 159-167.
- DU Chengmao, DU Xiong, SU Jingyuan, et al. Admittance modeling and subsynchronous oscillation risk analysis of DFIG-based wind turbine with stator current control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 159-167.
- [10] 孙东阳, 申文强, 孟繁易, 等. 基于自适应准谐振控制的DFIG-GSC次同步振荡抑制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(12): 63-73.
- SUN Dongyang, SHEN Wenqiang, MENG Fanyi, et al. Research on sub-synchronous oscillation suppression strategy of DFIG-GSC based on adaptive quasi-resonant control [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(12): 63-73.
- [11] 袁慧涛, 袁文涛, 王文敬, 等. 基于阻抗分析法的双馈风电机组经串补线路并网系统的次同步振荡特性研究[J]. 山东电力技术, 2024, 51(11): 48-60.
- YUAN Huitao, YUAN Wentao, WANG Wenjing, et al. Research on subsynchronous oscillation of doubly-fed wind turbines connected by series compensating lines based on impedance analysis method [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(11): 48-60.
- [12] CHEN A K, XIE D, ZHANG D M, et al. PI parameter tuning of converters for sub-synchronous interactions existing in grid-connected DFIG wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6345-6355.
- [13] ALIM T, ZHOU D, SONG Y P, et al. Analysis and mitigation of SSCI in DFIG systems with experimental validation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 714-723.
- [14] SHAIR J, XIE X R, LI Y H, et al. Hardware-in-the-loop and field validation of a rotor-side subsynchronous damping controller for a series compensated DFIG system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 698-709.
- [15] 张旭, 谢小荣, 刘辉, 等. 网侧次同步阻尼控制器的设计及其RTDS测试[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6503-6510.
- ZHANG Xu, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Design and RTDS test of the grid-side subsynchronous damping controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6503-6510.
- [16] YAO J, WANG X W, LI J W, et al. Sub-synchronous resonance damping control for series-compensated DFIG-based wind farm with improved particle swarm optimization algorithm [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 849-859.
- [17] SHAIR J, HEYDARIR, HASLER J P, et al. Advanced STATCOM technologies to mitigate subsynchronous oscillations: mitigation of subsynchronous oscillations through STATCOMs [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2026, 24(1): 108-115.
- [18] 张晓晨, 段向阳, 王志强, 等. 面向次同步振荡抑制的SVG控制方法[J]. 能源与环保, 2025, 47(10): 191-196, 203.
- ZHANG Xiaogao, DUAN Xiangyang, WANG Zhiqiang, et al. SVG control method for sub-synchronous oscillation suppression [J]. China Energy and Environmental Protection, 2025, 47(10): 191-196, 203.
- [19] 高本峰, 王晓, 梁纪峰, 等. 混合型统一潮流控制器抑制风电次同步振荡控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 53-64.
- GAO Benfeng, WANG Xiao, LIANG Jifeng, et al. Control strategy of hybrid unified power flow controller to suppress wind power sub-synchronous oscillation [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 53-64.
- [20] 王泽嘉, 韩民晓, 范溢文. 基于SVG附加电流反馈阻抗重塑的双馈风电场次/超同步振荡抑制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 55-66.
- WANG Zejia, HAN Minxiao, FAN Yiwen. Suppression strategy of sub/super-synchronous oscillations in doubly-fed wind farm based on SVG additional current feedback impedance reshaping [J]. Electric Power, 2024, 57(8): 55-66.
- [21] 宾子君, 孔祥平, 蒋昊, 等. 考虑SVG容性特征的海上风电场电压振荡分析及阻抗重塑研究[J]. 广东电力, 2025, 38(10): 79-93.
- BIN Zijun, KONG Xiangping, JIANG Hao, et al. Research on voltage oscillation analysis and impedance remodeling of offshore wind farms considering capacitive characteristics of SVG [J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(10): 79-93.
- [22] 鞠承玺, 李翠萍, 李军徽. 抑制风电场中次同步振荡的储能电池控制策略[J]. 电气应用, 2024, 43(7): 92-98.
- JU Chengxi, LI Cuiping, LI Junhui. A control strategy for energy storage batteries to suppress subsynchronous oscillations in wind farms [J]. Electrotechnical Application, 2024, 43(7): 92-98.
- [23] MORENO R, VISAIRO CRUZ N, A NÚÑEZ GUTIÉRREZ C A, et al. Supplementary loop in BESS control scheme for SSO mitigation in DFIG-based wind farms [J]. IEEE Latin America Transactions, 2024, 22(12): 1054-1062.
- [24] XUET, KARAAGACU, GHAFOURI M, et al. Review on DFIG supplementary SSI damping controllers: design, development, and directions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2025, 40(2): 797-809.
- [25] 赵伟, 李浩志, 李付强, 等. 抑制双馈风电场次同步振荡的自适应阻尼控制器设计及硬件在环试验[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4065-4072.
- ZHAO Wei, LI Haozhi, LI Fuqiang, et al. Adaptive damping controller designing and HIL testing for mitigating SSO in DFIG-based wind farm [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4065-4072.
- [26] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7200.

- JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7200.
- [27] 杨朋威,任正,王新宇,等. 基于MFAC附加阻尼控制器的次同步振荡抑制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(9): 68-78.
- YANG Pengwei, REN Zheng, WANG Xinyu, et al. Sub-synchronous oscillation suppression method based on MFAC sub-synchronous damping controller [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(9): 68-78.
- [28] 施星宇,傅俊诚,李泽文,等. 基于数据驱动鲁棒控制的双馈风机区间振荡附加阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(7): 2633-2644, I0015.
- SHI Xingyu, FU Juncheng, LI Zewen, et al. An inter-area oscillation supplementary damping control for DFIG wind farm based on data-driven robust control[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2025, 45(7): 2633-2644, I0015.
- [29] 吴熙,王梦婷,施星宇,等. 基于无模型自适应控制的双馈风机次同步振荡附加阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3601-3613.
- WU Xi, WANG Mengting, SHI Xingyu, et al. SSO supplementary damping control method for DFIG based on model-free adaptive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3601-3613.
- [30] WU X, WANG MT, SHAHIDEHPOUR M, et al. Model-free adaptive control of STATCOM for SSO mitigation in DFIG-based wind farm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5282-5293.
- [31] MENG F Y, SUND Y, ZHOU K, et al. A sub-synchronous oscillation suppression strategy for doubly fed wind power generation system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 83482-83498.
- [32] TIAN X S, CHI Y N, LI Y, et al. Coordinated damping optimization control of sub-synchronous oscillation for DFIG and SVG [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 140-149.
- [33] 边晓燕,丁炀,买坤,等. 海上风电场经VSC-HVDC并网的次同步振荡与抑制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 25-33.
- BIAN Xiaoyan, DING Yang, MAI Kun, et al. Subsynchronous oscillation caused by grid-connection of offshore wind farm through VSC-HVDC and its mitigation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 25-33.
- [34] 徐涛,刘泽楠,鲁亚楠,等. 基于协同阻尼控制技术抑制海上风电次同步振荡[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(6): 115-123.
- XU Tao, LIU Zenan, LU Yanan, et al. Subsynchronous oscillation suppression of offshore wind power based on cooperative damping control technology[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(6): 115-123.
- [35] 甄永赞,狄依容,胡永强,等. 数据驱动的风光场站次同步振荡多机协同阻尼控制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5855-5867, 5898.
- ZHEN Yongzan, DI Yirong, HU Yongqiang, et al. Data-driven multi-machine cooperative damping control for wind and photovoltaic plants restraining sub-synchronous oscillation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5855-5867, 5898.
- [36] SULE A H, MOKHTAR A S, BIN JAMIAN J J, et al. Grey wolf optimizer tuned PI controller for enhancing output parameters of fixed speed wind turbine [C]//2020 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS). IEEE, 2020: 118-122.
- [37] ÁGUILA-LEÓN J, CHIÑAS-PALACIOS C D, VARGAS-SALGADO C, et al. Optimal PID parameters tuning for a DC-DC boost converter: a performance comparative using grey wolf optimizer, particle swarm optimization and genetic algorithms [C]//2020 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). IEEE, 2020: 1-6.
- [38] 冯增喜,李丙辉,张聪. 基于遗传算法的MFAC参数寻优[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 170-174.
- FENG Zengxi, LI Binghui, ZHANG Cong. Optimizing the parameters of MFAC based on the genetic algorithm [J]. Computer Simulation, 2021, 38(3): 170-174.
- [39] 冯增喜,张聪,李丙辉. 基于改进粒子群优化算法的MFAC参数寻优[J]. 控制工程, 2021, 28(4): 766-773.
- FENG Zengxi, ZHANG Cong, LI Binghui. Optimization of MFAC parameters based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Control Engineering of China, 2021, 28(4): 766-773.

收稿日期: 2026-02-11 修回日期: 2026-03-12



许练楠

作者简介:

许练楠(2000),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制,E-mail: 1596191217@qq.com;

黄玲玲(1982),女,博士,教授,博士生导师,通信作者,主要研究方向为海上风电运维技术与海上风电并网规划等,E-mail: linglinghuang82@126.com;

吴晗(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为海上风电柔性直流输电与储能技术,Email: wuxh121@163.com;

郭雨龙(2000),男,硕士研究生,主要研究方向为海上风电运维技术,E-mail: 2730328018@qq.com。

(编辑 孙静琳)

附录 A

表 A1 图 1 参数说明

Table A1 Definition of parameters in fig. 1

参数	说明	参数	说明
i_{sabc}	定子侧三相电流	i_{rabc}	转子侧三相电流
i_{gabc}	网侧三相电流	i_{eabc}	储能三相电流
i_{rdq}	转子侧 dq 轴电流	i_{rdq}^*	转子侧外环控制输出 dq 轴电流参考值
i_{gdq}	网侧 dq 轴电流	i_{gdq}^*	网侧外环控制输出 dq 轴电流参考值
i_{edq}	储能逆变器侧 dq 轴电流	i_{edq}^*	储能逆变器侧外环控制输出 dq 轴电流参考值
u_{sabc}	定子侧三相电压	u_{rdq}^*	RSC 电流内环控制输出 dq 轴电压参考值
u_{gdq}	网侧 dq 轴电压	u_{gdq}^*	GSC 电流内环控制输出 dq 轴电压参考值
u_{edq}	储能逆变器侧 dq 轴电压	u_{edq}^*	储能电流内环控制输出 dq 轴电压参考值
P_{r}	流入 RSC 的有功功率	P_{r}^*	RSC 输出有功功率参考值
Q_{r}	流入 RSC 的无功功率	Q_{r}^*	RSC 输出无功功率参考值
u_{dc0}	风机电容侧直流电压	u_{dc0}^*	风机电容侧直流电压参考值
Q_{g}	流入 GSC 的无功功率	Q_{g}^*	GSC 输出无功功率参考值
u_{dc}	储能电容侧直流电压	u_{dc}^*	储能电容侧直流电压参考值
u_{eq}	储能逆变器侧交流电压	u_{eq}^*	储能逆变器侧交流电压参考值
σ	发电机漏磁系数	ω	两相旋转坐标系角速度
X_{g}	网侧滤波器感抗	X_{e}	储能逆变器侧感抗

表 A2 DFIG 参数

Table A2 Parameters of DFIG

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	5	定子电阻/pu	0.005 4
额定线电压/V	690	转子电阻/pu	0.006 07
额定频率/Hz	50	定子漏抗/pu	0.1
额定风速/(m/s)	11	转子漏抗/pu	0.11
额定转速/pu	1.2	定转子互感/pu	4.5
风机台数 N	100	转动惯量/pu	6

表 A3 储能参数

Table A3 Parameters of energy storage

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	100	初始荷电状态/%	80
额定能量/MWh	200	持续放电时间/h	2
交流侧电压/kV	35	T3 电阻/pu	0.06
额定直流电压/kV	10.5	T3 电抗/pu	0.10