

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240783

风储接入高比例水电系统超低频振荡抑制方法

王永飞, 江琴, 李保宏, 刘天琪, 张英敏

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对含风储接入的高比例水电系统中的超低频振荡问题, 为增强系统阻尼且不降低水电机组一次调频能力, 提出了基于风储侧耦合鲁棒控制的超低频振荡抑制方法。首先, 基于复转矩系数法分析了风储接入水电对系统阻尼特性的影响, 明确了风机及储能参与超低频振荡抑制的可行性。其次, 提出了基于振荡模式分解计算振荡能量的超低频振荡源定位方法, 并将振荡源机组的加速功率作为风储侧附加控制的反馈信号, 利用最小二乘-旋转不变算法辨识得到多输入多输出系统传递函数矩阵。最后, 根据混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制理论, 建立考虑阻尼比和控制性能的多目标函数, 迭代求解得到风储侧耦合鲁棒控制器最优参数。仿真结果表明, 风储系统附加鲁棒控制后, 能快速调节不平衡功率并增强超低频段的阻尼, 从而有效抑制超低频振荡。

关键词: 风储系统; 超低频振荡; 阻尼转矩; 振荡源定位; 鲁棒控制

Ultra-low-frequency oscillation suppression method in high-proportion hydro power systems with wind-storage integration

WANG Yongfei, JIANG Qin, LI Baohong, LIU Tianqi, ZHANG Yingmin

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To address the issue of ultra-low-frequency oscillation (ULFO) in high-proportion hydropower systems integrated with wind-storage, a suppression method based on coupled robust control on the wind-storage side is proposed to enhance system damping without compromising the primary frequency regulation capabilities of hydropower units. First, the impact of integrating wind and energy storage into hydropower systems on damping characteristics is analyzed using the complex torque coefficient method, demonstrating the feasibility of wind turbines and energy storage systems in suppressing ULFO. Next, a ULFO source localization method is introduced, one which calculates oscillation energy based on oscillation mode decomposition. The accelerating power of the oscillation source unit is then used as the feedback signal for additional control on the wind-storage side, and the least squares-rotation invariant technique is employed to identify the transfer function matrix of the multi-input multi-output system. Finally, based on hybrid H_2/H_∞ robust control theory, a multi-objective function that considers both damping ratio and control performance is established, and iterative solutions are applied to determine the optimal parameters of the coupled robust controller for the wind-storage side. Simulation results indicate that the additional robust control of the wind-storage system enables rapid adjustment of unbalanced power and enhances damping in the ultra-low-frequency range, effectively suppressing ULFOs.

This work is supported by the Young Scientists Fund of Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2024NSFSC0865).

Key words: wind-storage system; ultra-low frequency oscillation; damping torque; oscillation source localization; robust control

0 引言

双碳目标的提出, 标志着构建新能源为主体的

基金项目: 四川省自然科学基金青年科学基金项目资助 (2024NSFSC0865)

新型电力系统成为我国能源结构未来的建设方向^[1-3], 但水电作为传统清洁可再生能源仍然占据有利优势。如我国四川电网水电资源丰富, 并且正在大力开发新能源, 已成为实现双碳目标的中坚力量^[4]。风储大规模接入为水电外送系统的安全稳定运行带来了新的机遇和挑战。一方面, 实际工程试验已证明四

川电网作为典型的高比例水电送端系统, 由于水电机组及其调速器的负阻尼效应, 存在严重且罕见的超低频振荡风险。在此基础上, 大规模风电接入会极大地降低系统转动惯量从而进一步恶化系统频率稳定问题^[5-7]。另一方面, 风储系统平抑了传统风电的出力波动, 具有快速灵活的功率响应特性, 蕴藏可观的系统频率支撑潜力^[8-9]。因此, 研究风储系统接入水电系统的超低频振荡抑制方法具有重要的现实意义。

电力系统超低频振荡属于频率稳定范畴, 与一次调频过程强相关^[10]。与传统低频振荡不同, 励磁系统以及电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)参数对超低频振荡影响不大, 在超低频振荡过程中, 全网机组近乎呈同调振荡, 不存在机组间相对摇摆, 并且机械功率振荡幅度远大于电磁功率的振荡^[11-13], 主要原因是水电机组的水锤效应及其调速系统参数设置不合理使系统在超低频带呈负阻尼特性^[14]。

抑制超低频振荡的核心是增强系统的阻尼。目前, 针对水电机组的超低频抑制方法主要有调速器参数优化和附加控制器两类。对于前者, 由于调速系统是提供负阻尼的关键环节, 因此, 大部分研究立足于水轮机调速器, 如利用深度学习^[15]、粒子群算法^[16]等方法进行参数优化以提升系统阻尼, 但该方法极大地牺牲了调速器一次调频性能, 不利于系统故障后的频率快速恢复。而后者则是借鉴传统低频振荡抑制思路, 通过相位补偿增强系统阻尼, 如加装调速器侧电力系统稳定器(governor power system stabilizer, GPSS)或改造含超低频段控制的 PSS, 如 PSS4B 型^[17-18]。但该方法可能恶化其他频段阻尼, 大扰动下仍有超低频振荡风险。总的来看, 现有的超低频振荡抑制方法大多是基于水电机组的精确建模得到的, 然而实际水电机组调速系统由压力管道系统、机械液压随动系统、发电机系统等多个部分组成, 涉及复杂的机械、流体与电耦合问题, 导致水电机组参数存在不确定, 而且季节变化导致的水头波动也会造成系统存在不确定性, 传统控制存在鲁棒性不足的问题。

此外, 现有附加控制措施以系统频率为反馈信号^[19-20], 未考虑振荡源。而不同机组对超低频振荡的贡献程度不同, 通过选取合适的振荡源机组信号为附加控制提供反馈信号可进一步提升抑制效果。基于阻尼转矩分解的振荡源定位方法机理明确, 可利用振荡能量辨识负阻尼机组, 振荡能量可定义为发电机转子速度偏差与机械功率偏差乘积的积分^[21]; 可基于相轨迹对阻尼系数进行评估, 使用离线或在

线数据计算系统阻尼^[22]; 也能利用机械转矩与电磁转矩相位相反的关系, 间接计算得到机械功率的阻尼转矩实现振荡源定位^[23]。然而, 超低频振荡过程中也可能伴随着低频振荡, 此类方法并未考虑发电机转子速度中的低频振荡分量, 未进行振荡模式分解。常见的振荡模式信号分解主要为总体最小二乘-旋转不变技术(total least squares-estimation on signal parameters via rotational technique, TLS-ESPRIT), 该算法计算量小, 抗干扰能力强, 既可用于信号特征分析^[24], 也可用于系统辨识, 在低频振荡定位得到广泛应用^[25]。

随着四川电网的风电大规模并网, 风机出力的随机波动性进一步恶化了频率稳定问题^[26], 超低频振荡成为制约四川电网清洁能源外送的关键因素。已有部分相关研究基于阻尼转矩系数法分析了风电参与调频对于超低频振荡的影响, 分析关键参数对于超低频振荡影响, 为风电参与超低频振荡抑制的可行性提供了理论依据^[27-28]。为降低弃风率, 风电场常常会配套一定容量的储能, 现有储能常被用于辅助电力系统一次调频^[29], 平抑风电波动。风储系统弥补了风机出力随机性和波动性强的缺点, 具有灵活的动态调节能力^[30]。本文利用风储系统功率快速可调的优势, 设计风储侧附加阻尼控制器, 可抑制超低频振荡且保留了水电机组的一次调频能力, 增加系统频率调节能力。

综上, 现有的超低频振荡抑制方法主要集中于水电机组自身控制参数的整定, 改变了水电机组的一次调频能力且对振荡源机组的影响考虑不足。并且水力发电存在显著的季节性波动, 风储接入水电系统后机组特性更加复杂, 机组频率动态与低频振荡特性耦合^[31]。常规控制方式鲁棒性不足, 难以应对水风储系统多工况下的频率稳定风险。此外, 风储系统灵活的功率动态调节能力也有待发掘。

针对风储接入的高比例水电系统, 本文将充分利用风储系统的功率快速灵活调整能力, 并考虑振荡源机组的影响, 基于混合鲁棒控制理论, 设计风机及储能侧附加控制器, 提高系统阻尼水平, 实现超低频振荡的有效抑制。首先, 基于 TLS-ESPRIT 算法重构发电机转子与机械功率曲线, 基于振荡能量来实现超低频振荡源的准确定位; 其次, 选取振荡源机组的加速功率(机械功率与电磁功率差值)作为附加控制器的反馈信号, 通过 TLS-ESPRIT 算法辨识得到多输入多输出系统的传递函数矩阵; 最后, 基于混合鲁棒控制理论, 设定目标阻尼比、 H_2 性能参数、 H_∞ 性能参数, 迭代求解得到耦合鲁棒控制器参数, 并仿真验证了该方法的有效性。

1 考虑风储接入的水电系统超低频振荡抑制机理分析

1.1 风储系统模型及其控制方式

本文研究的风储系统采用外接储能的拓扑结构,即风电场和储能分别通过各自的变压器及输电线路接入电网,该结构具有储能配置灵活、可调性强的特点。风机采用双馈风机(doubly-fed induction generator, DFIG),由风力机、机械传动系统、双馈电机、背靠背换流器及其控制系统构成,如图1所示。

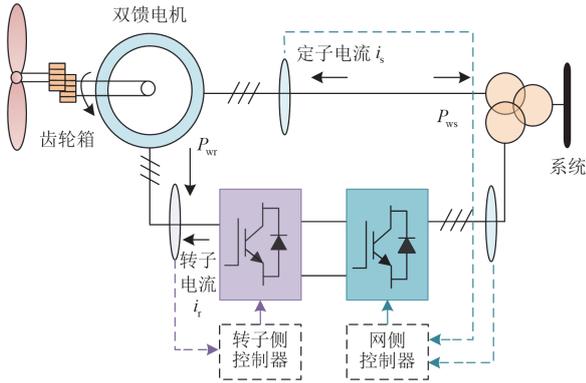


图1 双馈风机结构图

Fig. 1 Structure diagram of DFIG

DFIG 采用两个背靠背换流器进行交流励磁实现变速恒频运行。DFIG 的总输出功率 P_{we} 、定子功率 P_{ws} 、转子功率 P_{wr} 的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{ws} = \frac{\omega_g}{\omega_m} P_{we} \\ P_{wr} = \left(1 - \frac{\omega_g}{\omega_m}\right) P_{we} \\ \frac{P_{wr}}{P_{ws}} = \frac{\omega_m - \omega_g}{\omega_g} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_g 为电网角频率; ω_m 为风机转速角频率。

DFIG 的转子运动方程可以表示为

$$T_{wm} \frac{d\omega_m}{dt} - \frac{P_{we}}{\omega_m} - F\omega_m = 2H \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2)$$

式中: T_{wm} 为 DFIG 的机械转矩; F 为风机阻尼系数; H 为风机惯性时间常数。

DFIG 功率控制方式主要是对转子侧变流器的控制。转子侧变流器利用 d 、 q 解耦可实现对有功和无功的解耦控制,实现最大功率跟踪或是其他附加控制,具体结构为功率外环及电流内环组成的双环控制,如图2所示。网侧变流器的主要作用是维持直流电压及并网功率因数稳定。

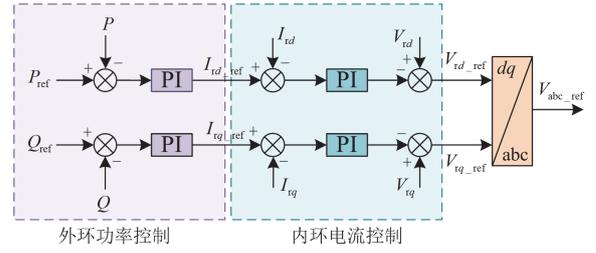


图2 转子侧变流器控制结构图

Fig. 2 Structure diagram of rotor side converter

图2中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功和无功功率参考值; I_{rd} 、 I_{rq} 分别为转子侧 d 、 q 轴电流; I_{rd_ref} 、 I_{rq_ref} 分别为转子侧 d 、 q 轴电流参考值; V_{rd} 、 V_{rq} 分别为转子侧 d 、 q 轴电压; V_{rd_ref} 、 V_{rq_ref} 分别为转子侧 d 、 q 轴电压参考值; V_{abc_ref} 为转子侧三相电压参考值。

储能系统主要由电池系统、功率转换系统构成,如图3所示。其中电池组主要以锂离子电池为主,具有循环次数高、寿命长和能量密度高等优点。功率转换系统为 DC/AC 变流器,可实现能量的双向传递,采用的是基于 d 、 q 解耦的直接电流矢量控制,实现有功和无功的解耦控制。

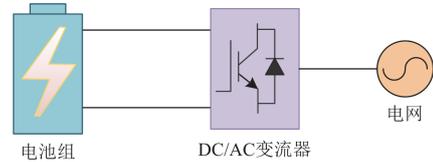


图3 储能拓扑结构图

Fig. 3 Structure diagram of energy storage topology

1.2 阻尼特性分析

水电机组简化一次调频模型如图4所示。其中: ΔP_m 为水轮机机械功率增量; $\Delta\omega$ 为同步发电机转速与额定转速的偏差; ΔP_c 为电磁功率增量。一次调频具体过程可以描述为,当负荷功率与发电机输出功率不平衡时,系统频率发生改变,负荷根据频率调节效应调整功率,水轮机经调速器调节机械功率,两者共同作用将频率稳定在允许范围内。

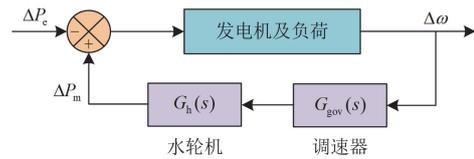


图4 水电机组简化一次调频模型

Fig. 4 Simplified primary frequency regulation model of hydropower unit

水轮机及其调速器传递函数 $G_h(s)$ 和 $G_{gov}(s)$ 分别表示为

$$G_h(s) = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \quad (3)$$

$$G_{gov}(s) = \frac{K_p s + K_I + K_D s^2}{b_p K_I + s} \cdot \frac{1}{1 + T_G s} \quad (4)$$

式中: T_w 为水流惯性时间常数; K_p 为比例增益系数; K_I 为积分增益系数; K_D 为微分增益系数; b_p 为调差系数; T_G 为伺服系统的时间常数。

需要指出的是, 与汽轮机一次调频特性不同, 水轮机“水锤效应”的短暂逆向调节作用将造成系统相位滞后, 当调速器比例积分微分(proportional integral derivative, PID)参数设置不合理时, 水电机组将在超低频率段呈负阻尼特性, 从而引发系统振荡, 即超低频振荡^[14]。

由于超低频振荡属于小扰动范畴, 为揭示超低频振荡阻尼特性, 将发电机的转子运动方程进行线性化可得

$$T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e - D\Delta\omega \quad (5)$$

式中: D 为阻尼系数; T_J 为惯性时间常数。

机组输入的机械功率变化量为

$$\Delta P_m = -G_h(s)G_{gov}(s)\Delta\omega \quad (6)$$

将 ΔP_m 在相平面 $\Delta\omega - \Delta\delta$ 分解可得

$$-\Delta P_m = K_S \Delta\delta + K_D \Delta\omega \quad (7)$$

式中: K_S 为机械功率同步转矩系数; $\Delta\delta$ 为功角变化量; K_D 为机械功率阻尼转矩系数, 可通过计算式(6)实部即得到。当 K_D 为正时, 类比于发电机阻尼系数, 振荡将衰减。

进一步考虑风储系统的接入, 由于超低频振荡属于频率稳定问题^[12], 可从功率平衡的角度出发, 改变风储系统的出力来影响超低频振荡。系统功率平衡方程为

$$\Delta P_e + \Delta P_{re} = \Delta P_L \quad (8)$$

式中: ΔP_{re} 为风储系统出力调节量; ΔP_L 为负荷功率变化量。

当风储系统参与超低频振荡抑制时, 忽略负荷频率调节效应, 可得

$$\Delta P_e = -\Delta P_{re} = K_{ED}\Delta\omega + K_{ES}\Delta\delta \quad (9)$$

式中: K_{ED} 为风储系统电磁功率的阻尼转矩分量; K_{ES} 为风储系统电磁功率的同步转矩分量。

将式(9)代入式(5), 得

$$T_J s^2 \Delta\delta + (K_D + K_{ED} + D)\Delta\omega + \omega_0 (K_{ES} + K_S)\Delta\delta = 0 \quad (10)$$

基于式(10), 可得系统的阻尼比为

$$\xi = \frac{K_D + K_{ED} + D}{2\sqrt{T_J \omega_0 (K_{ES} + K_S)}} \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 含风储接入的水电系统阻尼比受 K_{ED} 、 K_{ES} 、 K_D 和 K_S 共同影响。其中, 风储对系统阻尼的影响体现在 K_{ED} 和 K_{ES} 。因此, 基于风储系统的功率控制参与超低频振荡抑制是可行的。

2 基于超低频振荡源定位选取风储系统附加控制器反馈信号

2.1 系统辨识

风储系统可附加控制器调节输出功率, 从而抑制超低频振荡。为设计有效的控制器, 需要先建立被控系统的数学模型, 如系统的状态方程或传递函数。但是对于大规模电网, 系统的状态方程可能达到几千阶, 存在维数灾问题, 且不能保证求解速度, 不能满足电网实时计算监测需求, 因此, 对系统的模型进行快速辨识和降阶处理十分重要。本文将根据实测的输入/输出响应, 辨识振荡信号得到能准确模拟系统响应特性的低阶传递函数。

TLS-ESPRIT 算法被广泛应用于系统振荡模式分解及辨识, 其辨识的基本过程为: 首先建立基于测量信号的增广 Hankel 矩阵, 对 Hankel 矩阵进行奇异值分解得到信号子空间及噪声子空间, 从而实现消除噪声和提取基波的目标。进一步求取信号的旋转因子矩阵, 根据旋转因子矩阵的总体最小二乘解可得到信号中正弦分量的频率与衰减系数, 进而利用最小二乘法可得到信号各分量的幅值及初始相角^[25]。

针对含风储接入水电的多机系统, 其多输入多输出模型可表示为

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $y_1(s)$ 、 $y_2(s)$ 为系统的输出; $u_1(s)$ 、 $u_2(s)$ 分别为风机、储能的控制输入; $G_{11}(s)$ 为 $u_1(s) - y_1(s)$ 的传递函数; $G_{12}(s)$ 为 $u_2(s) - y_1(s)$ 的传递函数; $G_{21}(s)$ 为 $u_1(s) - y_2(s)$ 的传递函数; $G_{22}(s)$ 为 $u_2(s) - y_2(s)$ 的传递函数。 $G_{11}(s)$ 、 $G_{12}(s)$ 、 $G_{21}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 可通过在风机和储能处分别施加阶跃扰动后利用 TLS-ESPRIT 算法辨识得到。

2.2 基于振荡源定位的反馈信号选取

对于多输入多输出系统, 合理选择控制器的反馈信号是研究的难点之一, 若通过定位振荡源来选择反馈信号将有力提升振荡抑制效果。

如 1.2 节所述, 超低频振荡主要是由水锤效应

及调速系统引起的,主要表现为机械功率大幅振荡。并且超低频振荡初期可能会伴随低频振荡,仅用发电机转速与机械转矩相乘积分得到的能量未剔除低频振荡影响。为精准辨识振荡源机组,可根据发电机转速曲线及机械功率曲线,基于 TLS-ESPRIT 算法进行分解提取关键振荡模式,包括振荡频率、阻尼比、相位、幅值等信息。特别地,针对超低频振荡模式下的机械功率信号与发电机转速信号变换量进行重构,其振荡能量 $\Delta E_m(k)$ 为

$$\Delta E_m(k) = \int \Delta P_m(k) \Delta \omega(k) dt \quad (13)$$

式中: $\Delta P_m(k)$ 为重构后的机械功率信号; $\Delta \omega(k)$ 为重构后的发电机转子角速度信号。

根据阻尼转矩分析法可知,当 $\Delta E_m(k)$ 为正时,向系统振荡注入能量,机组为负阻尼,则可定位为系统振荡源。

由于机械功率在实际工程中难以测得,忽略发电机阻尼系数 D , 根据发电机转子运动方程可得

$$\Delta P_m = \Delta P_e + T_J \frac{d\Delta \omega}{dt} \quad (14)$$

在超低频频率振荡中,电网频率和发电机功率通常不在原平衡点附近振荡。振荡期间,电网频率会持续偏离初始值,与此同时,在一次调频作用下电磁功率也将偏离初始值,故需对数据进一步处理,可将实际量测数据与振荡时间段内的数据平均值之差作为可用数据^[21]。

可利用实测或仿真数据得到 ΔP_m 及 $\Delta \omega$, 经过振荡模式分解后,通过计算振荡能量定位振荡源,选择机组加速功率作为控制器输入信号。风储系统定功率侧附加控制器输出信号,使其可根据振荡源调整输出功率。

3 基于 H_2/H_∞ 鲁棒控制理论的风储系统超低频振荡抑制方法

对于高比例新能源接入后的水风储系统,由于风电的波动性和水电的季节性变化,常规控制难以适应。此外,水风储系统为多输入多输出系统,不同机组之间存在强耦合作用,极大限制了常规单输入单输出控制器的性能。为解决上述问题,本文基于混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制理论设计风储侧附加阻尼控制器^[32]。一方面,可应对复杂扰动,实现多工况稳定运行,另一方面,针对多输入多输出系统设计的耦合鲁棒控制可以协调多机组共同抑制振荡。

水风储控制系统模型如图 5 所示。根据 2.1 节分析,可通过 TLS-ESPRIT 算法辨识得到被控系统的传递函数矩阵 $G(s)$ 。图 5 中: $K(s)$ 为待设计的

风储侧附加耦合鲁棒控制器,控制器需要满足多控制目标,如阻尼比约束、 H_2 性能约束、 H_∞ 性能约束; $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$ 为鲁棒性评价的加权函数; $z_{\infty 1}$ 、 $z_{\infty 2}$ 、 z_2 为评估系统 H_2 、 H_∞ 性能的输出信号。

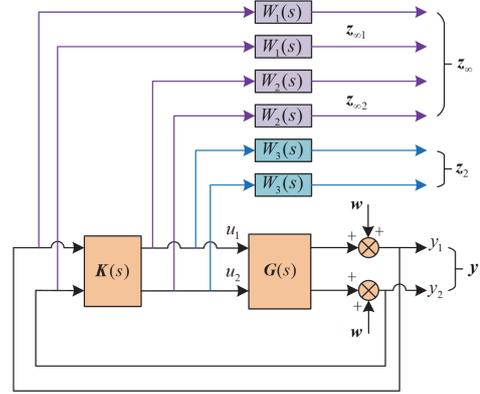


图 5 水风储控制系统模型图

Fig. 5 Diagram of hydro-wind-storage control system model

将传递函数 $G(s)$ 和待定的加权函数转换为状态空间描述,如式(15)所示。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z_\infty = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ z_2 = C_2 x + D_{22} u \\ y = C_y x + D_{y1} w + D_{y2} u \end{cases} \quad (15)$$

式中: x 为状态变量; w 为外部扰动信号; u 为附加控制器的输出, $u = [u_1 \ u_2]^T$, u_1 、 u_2 分别为风机和储能附加控制器输出; $z_\infty = [z_{\infty 1} \ z_{\infty 2}]^T$; y 为被控系统的输出, $y = [y_1 \ y_2]^T$, y_1 、 y_2 分别为两台主导的振荡源机组加速功率; A 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 、 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{22} 为状态方程参数矩阵; C_y 、 D_{y1} 、 D_{y2} 为输出方程参数矩阵。

风储侧附加耦合鲁棒控制器结构如图 6 所示,本文将所定位振荡源机组的加速功率信号作为附加耦合控制器的输入 y , 将风机和储能的功率信号作为附加耦合控制器的输出 u 。

控制器 $K(s)$ 状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{\eta}_c = A_c \eta_c + B_c y \\ u = C_c \eta_c \end{cases} \quad (16)$$

式中: A_c 、 B_c 与 C_c 为控制器状态方程矩阵; η_c 为控制器的状态变量。

联立式(15)和式(16)可得增加鲁棒控制器后系统的闭环传递函数矩阵如式(17)所示。

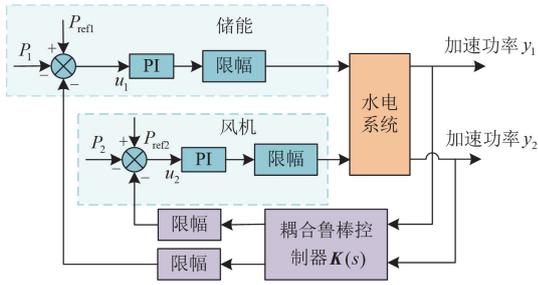


图6 耦合鲁棒控制器结构

Fig. 6 Structure of coupled robust controller

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ z_\infty \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C}_1 & \hat{D}_1 \\ \hat{C}_2 & \hat{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ w \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $\hat{x} = [x \ \eta_c]^T$; \hat{A} 、 \hat{B} 、 \hat{C}_1 、 \hat{D}_1 、 \hat{C}_2 和 \hat{D}_2 组成式(18)所示的闭环传递函数矩阵。

$$\begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C}_1 & \hat{D}_1 \\ \hat{C}_2 & \hat{D}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_2 C_c & B_1 \\ B_c C_y & A_c + B_c D_{y2} C_c & B_c D_{y1} \\ C_1 & D_{12} C_c & D_{11} \\ C_2 & D_{22} C_c & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.1 基于区域极点配置的阻尼比约束

有效提升阻尼水平是抑制超低频振荡的关键, 而闭环极点位置决定线性系统的阻尼比。因此, 附加控制器的设计目标1设定为满足超低频振荡阻尼要求, 本文采用区域极点配置的方法, 限制高频噪声增益, 保证所有闭环极点处于左半平面的指定区域内。极点配置区域形状多样, 有垂直条状、扇形区域、锥形区域等。针对超低频振荡类的弱阻尼系统, 基于锥形区域的极点配置最为合适, 如图7所示。设置锥形区域的夹角 θ , 则阻尼目标可以定义为阻尼比 ξ 需大于 $\cos\theta$ 区域的边界。

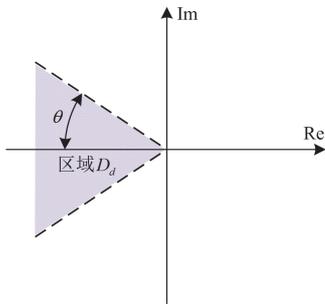


图7 极点配置区域图

Fig. 7 Region of pole placement

为使闭环极点位于区域 D_d , 即存在实矩阵 M 以及实对称阵 L 满足式(19)。

$$D_d = \{a \in \mathbf{C} \mid L + aM + \bar{a}M^T < 0\} \quad (19)$$

式中: \mathbf{C} 为复数域; a 为复数域中的元素; \bar{a} 为 a 的共轭。

矩阵 \hat{A} 所有特征值位于区域 D_d 的充要条件是存在对称正定矩阵 X_1 使得式(20)成立。

$$L \otimes X_1 + M \otimes (\hat{A}X_1) + M^T \otimes (\hat{A}X_1)^T < 0 \quad (20)$$

式中, “ \otimes ”表示矩阵的Kronecker乘积。

3.2 H_2 性能约束

考虑水风储系统控制代价, 附加控制器的设计目标2设定为满足闭环系统对 H_2 性能要求, 引入对称矩阵 Q , 给定常数 ζ , 满足式(21)。

$$\|G_{zw}(s)\|_2 < \zeta \quad (21)$$

式中, $G_{zw}(s)$ 表示 w 到 z_2 的闭环传递函数。

要满足式(21)中的系统控制代价, 当且仅当式(22)一式(24)成立。

$$\begin{bmatrix} \hat{A}^T X_1 + X_1 \hat{A} & X_1 \hat{B} \\ \hat{B}^T X_1 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 & \hat{C}_2^T \\ \hat{C}_2 & Q \end{bmatrix} > 0 \quad (23)$$

$$\text{Trace}(Q) < \zeta^2 \quad (24)$$

式中: $\text{Trace}(Q)$ 表示 Q 的迹; I 表示单位矩阵。

3.3 H_∞ 性能约束

进一步考虑系统水风储系统的不确定性, 附加控制器需要具有一定的抗外界干扰能力和模型不确定下的强适应能力。因此, 附加控制器的设计目标3设定为满足鲁棒性要求, 即 H_∞ 性能约束。令 w 到 z_∞ 的闭环传递函数矩阵 $T_{zw}(s)$ 的 H_∞ 范数小于给定常数 γ , 根据有界实定理, 该条件当且仅当式(25)成立。

$$\begin{bmatrix} \hat{A}^T X_1 + X_1 \hat{A} & X_1 \hat{B} & \hat{C}_1^T \\ \hat{B}^T X_1 & -\gamma I & \hat{D}_1^T \\ \hat{C}_1 & \hat{D}_1 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (25)$$

3.4 目标函数

根据系统对上述多控制目标的要求, 可确定 α 、 β 、 γ 、 ζ 等常数。为求解最优控制器, 设定的目标函数 $F(x)$ 如式(26)所示。

$$F(x) = \min \{ \alpha \|T_{zw}(s)\|_\infty + \beta \|G_{zw}(s)\|_2 \} \quad (26)$$

联立式(20)一式(25), 通过迭代计算可以得到满足式(26)的风储侧附加耦合鲁棒控制器的参数, 至此, 完成了控制器设计。

4 算例分析

为验证所提基于风储侧附加耦合鲁棒控制器对

超低频振荡抑制的有效性, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了含水风储的 6 机系统以及改进的 IEEE 10 机 39 节点系统进行仿真分析。

本文提出的抑制超低频振荡的风储侧附加耦合鲁棒控制器设计步骤总结如下。

1) 振荡源定位及反馈信号选取: 在水风储系统风机位置施加功率小扰动, 基于 2.2 节的振荡源定位方法识别负/弱阻尼机组, 采集振荡源机组的加速功率作为附加控制器输入信号。

2) 多输入输出系统模型辨识: 分别在风机侧和储能侧施加 2% 的功率阶跃扰动, 基于 TLS-ESPRIT 算法辨识得到系统部分传递函数, 并组成多输入输出系统完整的传递函数矩阵。

3) 附加控制器设计: 根据得到的传递函数矩阵, 基于混合鲁棒控制理论, 得到风储侧附加控制器参数, 仿真分析控制器在不同场景下的抑制效果。

4.1 水风储的 6 机系统算例

含水风储的多机系统结构如图 8 所示, 各发电机组出力设定为 $P_{G1} = 5500$ MW、 $P_{G2} = 4400$ MW、 $P_{G3} = 8000$ MW、 $P_{G4} = 2200$ MW、风机和储能出力共 1500 MW。

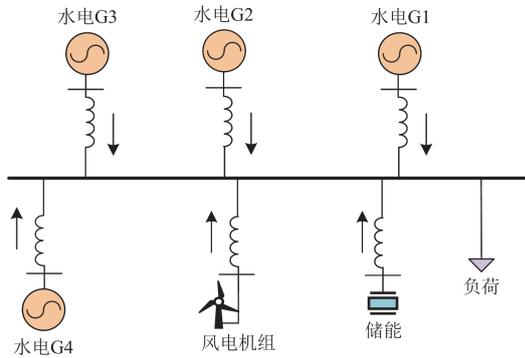


图 8 水风储多机系统结构图

Fig. 8 Structure of hydro-wind-storage multi-generator system

在风机侧施加功率扰动后, 系统发生超低频振荡, 计算得到各水电机组的振荡能量, 发电机 G1、G3 的振荡能量为正, 且明显大于发电机 G2、G4。发电机 G2 振荡能量接近于零, 几乎不提供振荡能量。发电机 G4 振荡能量为负, 为正阻尼机组。因此, 可定位 G1、G3 为振荡源机组。故选择发电机 G1、G3 的加速功率作为风储侧附加控制器的反馈信号。

分别在风机和储能处施加功率阶跃扰动。获取发电机 G1、G3 的加速功率作为系统输出 $y_1(s)$ 和 $y_2(s)$ 。风机的功率指令值为输入 $u_1(s)$, 储能的功

率指令值为输入 $u_2(s)$, 利用 TLS-ESPRIT 算法, 分别辨识 $G_{11}(s)$ 、 $G_{12}(s)$ 、 $G_{21}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 。

$$\begin{cases} G_{11}(s) = \frac{0.09s^4 + 0.13s^3 + 0.71s^2 + 1.15s}{s^4 + 0.57s^3 + 9.3s^2 - 0.7s + 1.57} \\ G_{12}(s) = \frac{0.06s^4 + 0.09s^3 + 0.51s^2 + 0.1s}{s^4 + 0.83s^3 + 9.8s^2 - 0.66s + 1.61} \\ G_{21}(s) = \frac{-0.08s^4 - 0.15s^3 - 0.66s^2 - 0.17s}{s^4 + 0.6s^3 + 9.74s^2 - 0.76s + 1.71} \\ G_{22}(s) = \frac{-0.05s^4 - 0.1s^3 - 0.5s^2 - 0.11s}{s^4 + 0.93s^3 + 10.66s^2 - 0.72s + 1.82} \end{cases} \quad (27)$$

接着, 设定目标阻尼比大于 5%, 评价函数设定为 $W_1(s) = 5s / (s + 100)$, $W_2(s) = 100 / (100s + 1)$, $W_3(s) = 1$, 通过 Matlab 的线性矩阵不等式 LMI 求解工具箱求解第 3 节建立的多目标约束方程, 可得到用于超低频振荡抑制的风储侧耦合鲁棒控制器 $K(s)$ 为

$$\begin{cases} K_{11}(s) = \frac{-0.74s^3 - 0.84s^2 - 7.63s - 6.28}{s^4 + 0.66s^3 + 10.34s^2 + 3.7s + 1.72} \\ K_{12}(s) = \frac{-0.89s^3 - 1.12s^2 - 11.53s - 10.12}{s^4 + 0.77s^3 + 12.87s^2 + 4.24s + 2.1} \\ K_{21}(s) = \frac{0.9s^3 + 1.06s^2 + 9.84s + 7.15}{s^4 + 0.79s^3 + 10.86s^2 + 3.86s + 1.89} \\ K_{22}(s) = \frac{1.07s^3 + 2.42s^2 + 19.25s + 14.6}{s^4 + 1.82s^3 + 17.57s^2 + 5.79s + 2.92} \end{cases} \quad (28)$$

基于图 8 所示系统, 在风储侧附加参数如式(28)所示的耦合鲁棒控制器。需要指出, 由于超低频振荡周期为数十秒级, 振荡时间一般长达数分钟或数小时, 故可忽略广域通信带来的延迟影响。为进一步验证抑制效果, 考虑了非振荡源信号的鲁棒控制效果, 并加入了传统 PI 控制进行对比分析, 传统 PI 控制包括隔直环节、PI 环节与限幅环节。

情景 1: 负荷减少约 2500 MW, 不同控制情况下系统频率曲线对比如图 9 所示。风储不参与功率调节时, 系统发生超低频振荡, 频率最高点达到 50.7 Hz, 并有进一步扩大的趋势。同时, 基于振荡源信号较基于非振荡源信号的鲁棒控制器抑制效果更佳, 基于振荡源信号的附加鲁棒控制下, 系统频率最高点为 50.1 Hz, 基于非振荡源信号的频率峰值为 50.2 Hz, 与传统 PI 控制峰值相同, 50.2 Hz 为正常运行的频率上限, 非振荡源信号控制下的系统频率容易越限。

情景 2: 考虑系统同时发生小扰动及三相接地短路扰动, 即负荷减少约 2500 MW, 交流侧发生持

续时间为 0.1 s 的三相短路接地故障, 系统频率曲线对比如图 10 所示。基于振荡源信号的鲁棒控制, 相比于传统 PI 控制、非振荡源信号的鲁棒控制, 系统阻尼强, 调节能力强, 频率几乎无振荡, 系统最大频率偏差为 ± 0.1 Hz。

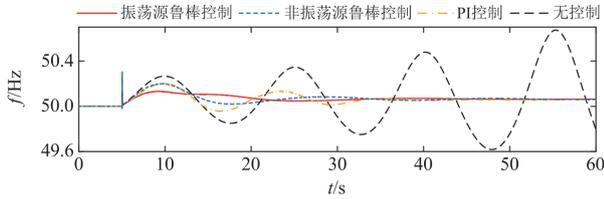


图 9 情景 1 多机系统不同控制下频率曲线对比图

Fig. 9 Comparison of frequency curves of multi-generator system under different control in scenario 1

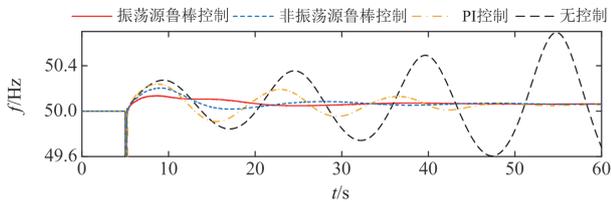


图 10 情景 2 多机系统不同控制下频率曲线对比图

Fig. 10 Comparison of frequency curves of multi-generator system under different control in scenario 2

4.2 改进的 IEEE 10 机 39 节点系统仿真算例

改进的 IEEE 10 机 39 节点系统结构如图 11 所示, 其主要用于模拟实际大电网动态行为, 系统主要参数如表 1 所示。

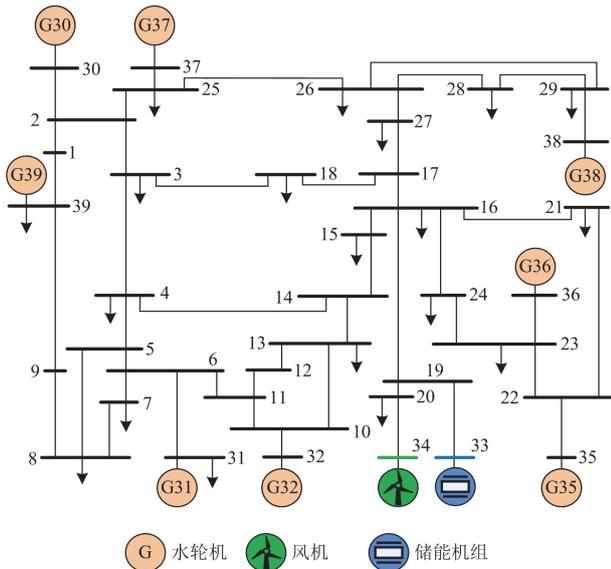


图 11 改进的 IEEE 10 机 39 节点系统结构图

Fig. 11 Structure of IEEE improved 10-generator 39-bus system

表 1 改进的 IEEE 10 机 39 节点系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the improved IEEE 10-generator 39-bus system

发电机	输出功率/MW	发电机	输出功率/MW
G30	240	G37	900
G31	1950	G38	1200
G32	550	G39	1300
G35	1450	双馈风机	630
G36	1000	储能	0

通过 TLS-ESPRIT 算法辨识得到系统传递函数, 设定相应的鲁棒控制指标参数, 可得到用于超低频振荡抑制的风储侧耦合鲁棒控制器 $K(s)$ 为

$$\begin{cases} K_{11}(s) = \frac{0.42s^3 - 0.31s^2 - 1.4s - 0.43}{s^4 + 1.524s^3 + 13.04s^2 + 3.532s + 3.347} \\ K_{12}(s) = \frac{-0.0022s^3 - 0.0218s^2 - 0.0033s - 0.23}{s^4 + 1.05s^3 + 10.34s^2 + 2.41s + 2.62} \\ K_{21}(s) = \frac{-0.42s^3 - 1.35s^2 - 21.16s + 3.5}{s^4 + 3.888s^3 + 56.39s^2 + 11.37s + 15.57} \\ K_{22}(s) = \frac{0.11s^3 + 0.026s^2 + 0.037s + 0.0061}{s^4 + 101s^3 + 24.02s^2 + 34.29s + 4.763} \end{cases} \quad (29)$$

基于图 11 所示系统, 在风储侧附加式(29)中的耦合鲁棒控制器, 并与无控制、传统 PI 控制、非振荡源鲁棒控制对比, 水电机组振荡能量曲线如图 12 所示。

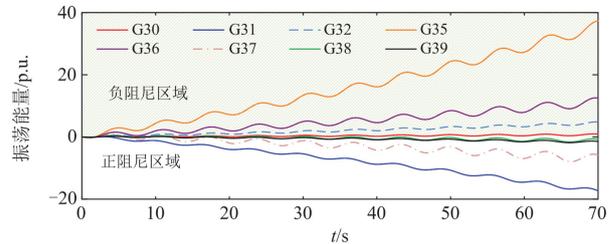


图 12 水电机组振荡能量曲线

Fig. 12 Oscillation energy curve of hydropower units

扰动 1: $t = 3$ s 时, 负荷减少 600 MW, 不同控制下系统频率曲线对比如图 13 所示。在无控制下, 发生超低频振荡, 振荡频率为 0.08 Hz, 振荡发散, 整个系统为负阻尼。基于振荡源定位的鲁棒控制阻尼优于传统 PI 控制和非振荡源鲁棒控制, 两个周期后频率振荡消失, 其余控制还有小幅度振荡。另外基于振荡源定位的鲁棒控制最大频率偏差较小, 更符合系统频率偏差要求。

扰动 2: $t = 3$ s 时, 负荷减少 1200 MW, 同时发生三相接地短路故障持续 0.1 s, 不同控制下系统频率曲线对比如图 14 所示。在无附加控制情况下发生超低频振荡, 振荡周期约为 14 s, 振幅有进一步

扩大趋势。风储侧附加控制参与功率动态调节可以有效增强系统阻尼，抑制超低频振荡。相比于常规PI控制，本文所提的基于振荡源定位的风储侧耦合鲁棒控制方法展现出更优的控制性能，选择振荡源为反馈信号具有更佳的控制效果，频率偏差会更小。

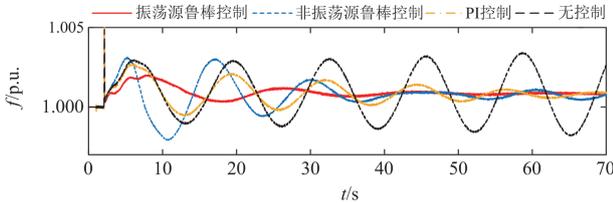


图 13 发生扰动 1 不同控制下系统频率曲线对比图

Fig. 13 Comparison of frequency curves of system under different control in disturbance 1

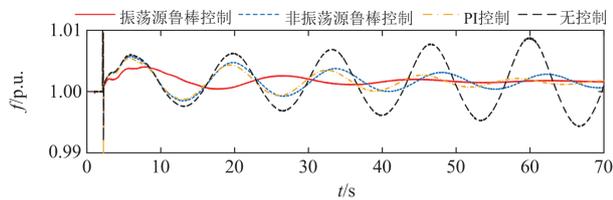


图 14 发生扰动 2 不同控制下系统频率曲线对比图

Fig. 14 Comparison of frequency curves of system under different control in disturbance 2

5 结论

针对四川电网高比例新能源和水电引起的频率振荡突出的问题，本文利用风机和储能的灵活性，提出了基于振荡源定位的风储侧鲁棒控制方法。

1) 分析了含风储接入的水电系统阻尼特性，揭示了风机与储能参与超低频振荡抑制的机理，为超低频振荡的抑制提供了新思路。

2) 提出了超低频振荡源定位及风储侧附加控制反馈信号选取的方法。基于 TLS-ESPRIT 算法辨识机组振荡信号获取超低频振荡模态，并通过重构信号计算机组振荡能量实现了超低频振荡源准确定位。选择振荡源机组的加速功率作为附加控制得到最优反馈信号，增强了控制的有效性。

3) 提出了基于 H_2/H_∞ 混合鲁棒控制理论的风储侧附加控制方法，考虑风机和储能的耦合作用，设计了多目标鲁棒控制器，能满足阻尼及控制性能要求，并优于传统控制，实现超低频振荡的有效抑制。

本文所提超低频振荡控制方法充分利用风机和储能的灵活可调性能优势，相比常规通过优化调速器参数的方法，在保留了水电一次调频性能的基础上实现振荡的有效抑制，为双碳目标下含水风等高

比例可再生能源系统的稳定运行提供了保障。但如何协调风储系统同时参与超低频振荡抑制和一次调频有待进一步研究。

参考文献

[1] 王雪, 刘林, 卓庆东, 等. 基于虚拟惯量控制的新型电力系统功率差前馈振荡抑制方法[J]. 中国电力, 2024, 57(4): 68-76.
WANG Xue, LIU Lin, ZHUO Qingdong, et al. Power difference feed-forward oscillation suppression method for new power system based on virtual inertial control[J]. Electric Power, 2024, 57(4): 68-76.

[2] 孙建华, 王佳旭, 杜晓勇, 等. 考虑频率安全约束的高比例风电电力系统储能优化配置策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 151-162.
SUN Jianhua, WANG Jiayu, DU Xiaoyong, et al. Optimization strategy for energy storage configuration in high proportion wind power system considering frequency safety constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 151-162.

[3] 杨捷, 孙哲, 苏辛一, 等. 考虑振荡型功率的直流微电网储能系统无互联通信网络的多目标功率分配方法[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 341-352.
YANG Jie, SUN Zhe, SU Xinyi, et al. A wireless multi-objective power sharing method for energy storage system in dc micro-grid considering oscillatory-type power[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 341-352.

[4] 徐秋实, 施通勤, 井浩然, 等. 面向新型电力系统的输电网与分布式变速抽水蓄能联合规划[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 128-137.
XU Qiushi, SHI Tongqin, JING Haoran, et al. Joint planning of a transmission network and distributed variable speed pumped storage for a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 128-137.

[5] 李东东, 董楠, 姚寅, 等. 考虑频率响应分散性及系统分区的含风电系统等效惯量估计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 36-45.
LI Dongdong, DONG Nan, YAO Yin, et al. Equivalent inertia estimation of a power system containing wind power considering dispersion of frequency response and system partitioning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 36-45.

[6] EL-BAHAY M H, LOTFY M E, EL-HAMEED M A. Effective participation of wind turbines in frequency control of a two-area power system using coot optimization[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023,

- 8(1): 1-14.
- [7] 刘洪波, 刘永发, 任阳, 等. 高风电渗透率下考虑系统风电备用容量的储能配置[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 260-272.
LIU Hongbo, LIU Yongfa, REN Yang, et al. Energy storage configuration considering the system wind power reserve capacity under high wind power permeability[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 260-272.
- [8] 张小莲, 覃世球, 张仰飞, 等. 考虑储能荷电状态的风储联合调频控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4120-4130.
ZHANG Xiaolian, QIN Shiqiu, ZHANG Yangfei, et al. Wind turbine and storage joint frequency modulation control strategy considering energy storage state of charge[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4120-4130.
- [9] 周年光, 谢欣涛, 马俊杰, 等. 风电场配套储能的自适应虚拟惯性一阻尼控制[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 150-158.
ZHOU Nianguang, XIE Xintao, MA Junjie, et al. An adaptive virtual inertial damping control for wind farm integrated energy storage system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 150-158.
- [10] 路晓敏, 陈磊, 陈亦平, 等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 64-70.
LU Xiaomin, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Ultra-low-frequency oscillation of power system primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 64-70.
- [11] 高建瑞, 李国杰, 汪可友, 等. 电力系统超低频振荡的阻尼与同步转矩分析[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1001-1007.
GAO Jianrui, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Damping torque and synchronous torque analysis of power system ultra-low frequency oscillation[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1001-1007.
- [12] 薛安成, 王嘉伟, 刘晓博, 等. 电力系统超低频频率振荡机理分析与抑制研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 553-567.
XUE Ancheng, WANG Jiawei, LIU Xiaobo, et al. Survey and prospect of ultra-low frequency oscillation mechanism analysis and suppression in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 553-567.
- [13] 王鹏, 刘天琪, 王顺亮, 等. 水电机组超低频振荡小信号模型及影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5942-5955.
WANG Peng, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. Small-signal model and influencing factors analysis of ultra-low frequency oscillation in hydropower unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5942-5955.
- [14] 刘春晓, 张俊峰, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的机理分析与仿真[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 29-34.
LIU Chunxiao, ZHANG Junfeng, CHEN Yiping, et al. Mechanism analysis and simulation on ultra-low frequency oscillation of Yunnan power grid in asynchronous interconnection mode[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 29-34.
- [15] ZHANG Gouzhou, ZHAO Junbo, HU Weihao, et al. A multiagent deep reinforcement learning-enabled dual-branch damping controller for multimode oscillation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 31(1): 483-492.
- [16] 肖灿, 王德林, 李振鹏, 等. 抑制电力系统超低频振荡的水轮机调速器参数优化控制研究[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2135-2142.
XIAO Can, WANG Delin, LI Zhenpeng, et al. Research on parameter optimization control of turbine governor for suppressing ultra-low frequency oscillation in power systems[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2135-2142.
- [17] 张建新, 陈刚, 周剑, 等. 采用调速器附加阻尼控制抑制异步后云南电网超低频振荡[J]. 南方电网技术, 2018, 12(7): 38-43, 51.
ZHANG Jianxin, CHEN Gang, ZHOU Jian, et al. Suppression of very low frequency oscillation in asynchronous Yunnan grid based on hydroelectric governor additional damping control[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(7): 38-43, 51.
- [18] ZHOU Xin, USMAN M, HE Peng, et al. Parameter design of governor power system stabilizer to suppress ultra-low-frequency oscillations based on phase compensation[J]. Electrical Engineering, 2021, 103(1): 685-696.
- [19] 许寅, 王佳璇, 吴翔宇, 等. 水光互补发电系统超低频振荡抑制控制策略研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(12): 1248-1257.
XU Yin, WANG Jiaxuan, WU Xiangyu, et al. Suppression control strategy of ultra-low frequency oscillation in hydro-PV complementary generation system[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(12): 1248-1257.
- [20] 李伟, 肖湘宁, 郭琦. 云广特高压直流送端孤岛运行超低频振荡与措施[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 161-166.
LI Wei, XIAO Xiangning, GUO Qi. Ultra-low-frequency oscillation and countermeasures in Yunnan-Guangdong UHVDC sending-end system in islanded operating mode[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 161-166.
- [21] 李莹, 富亚洲, 王官宏, 等. 电力系统超低频率振荡分析及扰动源定位[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1770-1780.
LI Ying, FU Yazhou, WANG Guanhong, et al. Ultra-low frequency oscillation analysis and location in power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1770-1780.
- [22] 郭岐, 陆雪顶, 王光政. 基于相轨迹的机组阻尼系数最小二乘量化方法[J]. 中国农村水利水电, 2023(2): 233-238.
GUO Qi, LU Xueding, WANG Guangzheng. Least-squares quantization of unit damping coefficients based on phase trajectories[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(2): 233-238.
- [23] 马骞, 杨荣照, 朱泽翔, 等. 超低频振荡主导机组的在线监控方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(4): 66-72.
MA Qian, YANG Rongzhao, ZHU Zexiang, et al. An online monitoring and control method of dominant unit in ultra-low frequency oscillation[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(4): 66-72.
- [24] 王铀程, 陈蓉, 杨勇. 基于改进 TLS-ESPRIT 与自卷积窗的谐波与间谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 159-168.
WANG Youcheng, CHEN Rong, YANG Yong. Harmonic and inter-harmonic detection algorithm based on improved TLS-ESPRIT and a self-convolution window[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 159-168.
- [25] 李阳海, 黄莹, 刘巨, 等. 基于阻尼转矩分析的电力系统低频振荡源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 84-91.
LI Yanghai, HUANG Ying, LIU Ju, et al. Power system oscillation source location based on damping torque analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 84-91.
- [26] 陈雪梅, 陆超, 韩英铎. 电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 1-9.
CHEN Xuemei, LU Chao, HAN Yingduo. Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 1-9.
- [27] 何廷一, 束洪春, 李胜男, 等. 风电参与调频对电力系统超低频振荡的影响分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(8): 1113-1121.
HE Tingyi, SHU Hongchun, LI Shengnan, et al. Analysis of the influence of wind power participating in frequency regulation on the ultra-low frequency oscillation of power system[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(8): 1113-1121.
- [28] SUN Li, ZHAO Xiaowei. Modelling and analysis of frequency-responsive wind turbine involved in power system ultra-low frequency oscillation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 13(2): 844-855.
- [29] 赵熙临, 李品, 付波. 基于频率响应特性的储能辅助电网调频方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 41-49, 67.
ZHAO Xilin, LI Pin, FU Bo. Frequency regulation method assisted by energy storage based on frequency response characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 41-49, 67.
- [30] 张冠锋, 杨俊友, 王海鑫, 等. 基于虚拟同步机技术的风储系统协调调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(增刊 1): 83-92.
ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, WANG Haixin, et al. Coordinated frequency modulation control strategy of wind farm storage system based on virtual synchronous generator technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 83-92.
- [31] 马睿聪, 刘福锁, 曹永吉, 等. 电力系统频率动态与功角振荡的耦合特性分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 102-112.
MA Ruicong, LIU Fusuo, CAO Yongji, et al. Coupling characteristic analysis of power system frequency dynamic and power angle oscillation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 102-112.
- [32] 孙天一, 李保宏, 江琴, 等. 基于多类型换流设备的受端电网耦合鲁棒阻尼控制策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3): 210-216.
SUN Tianyi, LI Baohong, JIANG Qin, et al. Coupling robust damping control strategy for receiving-end power grid based on multi-type of converter devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 210-216.

收稿日期: 2024-06-24; 修回日期: 2024-08-22

作者简介:

王永飞(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定与控制、频率稳定; E-mail: wangyongfei_scu@163.com

江琴(1994—), 女, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电; E-mail: eejqin@scu.edu.cn

李保宏(1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。E-mail: scu_lbh@163.com
(编辑 张颖)