

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241506

一种考虑频率二次跌落的风火联合调频控制策略

杨婷婷¹, 徐永强¹, 李浩千², 柳玉³, 吴鑫彦¹, 吕游¹

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 国能国华(北京)燃气热电有限公司, 北京 100018;
3. 国家电网公司华北分部, 北京 100032)

摘要: 随着风电在电力系统中占比的逐年攀升, 传统机组单独承担调频任务已难以适应其需求变化。因此, 风电需具备与传统电源协同调节系统频率的能力。首先, 基于风电调频的快速性和火电调频的持久性, 设计了一种以火电为主、风电为辅的联合一次调频控制策略。其次, 充分考虑风电场内各机组的运行差异, 提出一种基于裕度因子的功率分配策略, 有效挖掘各机组的调频能力并确保其安全运行。同时, 提出一种针对风电场内风机分组运行的持久备用功率再分配策略。该策略预先安排少数风电机组以低减载率的超速模式运行, 当调频风机退出频率支撑后, 减载风机将根据调频风机的转速, 采用一种基于转速反比例因子的差异化能量分配策略, 以有效弥补调频风机退出后的能量缺额, 缓解频率二次跌落(secondary frequency drop, SFD)。仿真结果表明, 所提策略能够实现风火联合参与一次调频, 在保证经济性和可靠性的前提下, 充分发掘风电调频性能, 有效改善电力系统频率响应特性。
关键词: 风火联合; 一次调频; 裕度因子; 低减载率; 反比例因子; 频率二次跌落

A wind-thermal coordinated frequency regulation strategy considering secondary frequency drop

YANG Tingting¹, XU Yongqiang¹, LI Haoqian², LIU Yu³, WU Xinyan¹, LÜ You¹

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Guoneng Guohua (Beijing) Cogeneration Power Co., Ltd., Beijing 100018, China;
3. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China)

Abstract: With the increasing penetration of wind power in power systems, it has become challenging for traditional generation units alone to meet frequency regulation requirements. Therefore, wind power must be capable of coordinating with traditional power sources to jointly regulate system frequency. Based on the fast frequency response of wind power and the sustained regulation capability of thermal units, a coordinated primary frequency regulation strategy dominated by thermal units and supported by wind power is proposed. To account for the operational differences among wind turbines within a wind farm, a power distribution strategy based on a margin factor is proposed to effectively harness the frequency regulation potential of each turbine while ensuring safe operation. Meanwhile, a persistent reserve power re-distribution strategy for grouped wind turbine operation is developed. This strategy pre-schedules a small number of wind turbines to operate in overspeed mode with a low de-loading rate. When frequency-regulating wind turbines withdraw from frequency support, the de-loaded turbines compensate for the resulting energy deficit according to a differentiated energy allocation scheme based on an inverse rotor-speed factor. This approach effectively mitigates the secondary frequency dip (SFD). Simulation results demonstrate that the proposed strategy enables coordinated primary frequency regulation between wind and thermal units, fully exploits the frequency regulation capability of wind power, and significantly improves system frequency response performance while maintaining economic efficiency and reliability.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52476009).

Key words: wind-thermal coordination; primary frequency regulation; margin factor; low de-loading rate; inverse proportional factor; secondary frequency drop

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52476009)

0 引言

在“双碳”政策导向下, 新能源的开发与利用正逐步成为公众关注的热点^[1]。经过多年技术积累与发展, 风电已成为一种相对成熟的新能源发电形式, 其在电力系统中的占比正逐年稳步上升^[2]。双馈风机作为风电市场的主力军, 广泛通过电力电子装置接入电网系统, 但其转子频率与电网频率解耦, 因此不具备传统同步发电机主动提供频率支撑的功能, 导致系统调频能力显著下降, 使得电力系统的频率稳定面临着严峻挑战^[3]。

针对大规模风电并网可能对系统频率带来的不利影响, 包括中国在内的许多国家都更新了电网规范^[4]。以我国 2020 年发布的《电力系统安全稳定导则》为例, 其中明确指出风电场需具备参与电力系统一次调频的能力^[5]。所以近年来, 国内外众多学者围绕风电有效参与系统频率控制展开了深入研究, 以期提升整个电力系统的频率稳定性。

为使风机具有一次调频能力, 现有研究普遍采用附加功率控制器的方法^[6]。目前风电场内风机主要通过转子动能控制^[7]、功率备用控制^[8]和附加储能系统控制^[9]三种途径实现该目标。转子动能控制技术能够在风机保持最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)运行状态时实施, 它利用释放转子中的动能来提供系统所需的频率支持, 相较于仅采用减载控制的方法, 该方法在经济上更为可行^[10]。转子动能控制通常通过在 MPPT 控制基础上叠加一个附加控制的方式来实现^[11]。

但多数研究着重考虑将风电集群等值为单机加以的控制, 同时忽视了尾流效应^[12]等因素导致的各机组间差异, 使得风电场的运行状况未能得到全面准确的反映。因此, 在制定风电场调频方案时, 须全面考虑场内各风机运行状态的差异性, 并协调各风机共同参与到频率调节中, 充分发掘和利用风电场自身的调频能力, 从而有效提升系统的频率表现。针对风机集群的功率分配方法, 多数采用按场内机组数目平均分配算法^[13]、按机组额定功率比例分配算法^[14]等。文献[15]提出考虑风速差异的风电场减载方案与一次调频策略, 考虑不同风速下风机减载能力的差异性并制定风电场内减载功率分配方案, 保证备用功率的充分释放。然而, 这种策略在系统常规运行时风机仍需维持在减载状态, 从而限制了风能的完全利用。文献[16]提出了一种基于一致性分布式控制策略的频率支撑功率分配方法, 通过使风机集群跟随主导风机的工作状态来参与调频。尽管该策略能够有效发挥各风机的调频潜能, 但它采

用的是一种有领导式的算法, 其控制效果在很大程度上依赖主导风机的运行状况。如果主导风机发生通信故障, 整个风电场将无法继续参与频率调节。文献[17]通过分析不同风场的调频特性, 提出了基于多动态差异化时序协同的频率支撑控制策略, 但该策略中不同风场调频的顺序与出力判定比较复杂, 实际应用存在一定困难。

考虑到风机的转速阈值, 风机完成频率支撑阶段的转速动能释放后, 需要对转子进行转速恢复。然而, 风机转速恢复时需要降低电磁转矩来提升转子转速, 将会造成功率缺额, 易引起系统频率的再次跌落, 即频率二次跌落^[18](secondary frequency drop, SFD)。针对 SFD, 文献[19]提出一种渐进式转速恢复策略实现不同控制阶段的平滑切换, 但转速恢复时间较长。文献[20]提出超速与变桨减载协调策略, 通过备用功率缓解二次跌落, 长期单一的备用减载, 容易造成弃风以及机械磨损。文献[21]提出了一种基于风机旋转备用和直流侧电容器的风-储联合控制策略, 该策略能够提高风电调频性能, 但面临储能系统投资与运营成本较高的问题。

综上所述, 针对风电场参与一次调频存在的问题, 本文提出了一种考虑频率二次跌落的风火联合调频策略。首先, 在联调控制层, 风电调频机组基于调度中心下发的功率缺口信息和火电机组增发功率信息, 承担初期的调频响应任务。随着火电逐渐增加出力, 支撑任务从风电过渡到火电, 调频机组则恢复到 MPPT 模式, 准备参与下一次系统调频。其次, 在风电场控制层, 调频风机利用转子可调频裕度确定不同风电机组需要分担火电响应初期功率缺额的比例, 将调度层产生的功率参考信号进行有序分配, 最大限度地发挥风机的调频性能; 调频机组转速恢复时期, 预设的减载风机根据其转速按反比例分配备用功率, 以快速补偿转速恢复初期造成的功率缺额, 缓解频率二次跌落。最后, 通过仿真验证了所提控制策略的有效性和实用性。

1 风火联合一次调频系统建立

1.1 风电机组模型与超速控制

根据空气动力学理论, 双馈风机从空气中捕获的机械功率可表示为^[22]

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \\ C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda}} + C_6 \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_m 为机械功率; ρ 为空气密度; R 为风机半

径； v 为环境风速； β 为桨距角； λ 为叶尖速比，

$\lambda = \frac{\omega_{r,nom} R}{v}$ ，其中 $\omega_{r,nom}$ 为转子转速； $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数； $\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}\right)^{-1}$ ； $C_1 - C_6$ 表示风力涡轮机的系数。风机运行在 MPPT^[22] 控制模式下，控制器使桨距角 β 保持在 0° 附近，不发生变化。该模式下通过调节风机转速，存在唯一的 λ 使得 C_p 最大，称为最佳叶尖速比 λ_{opt} ，具体如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{MPPT} = K_{opt} \omega_{r,nom}^3 \\ K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_p^{max}}{\lambda_{opt}^3} \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_{MPPT} 、 K_{opt} 、 C_p^{max} 分别表示最大输出功率、MPPT 系数、最大风能利用系数。

超速控制^[23]是将风机工作点从最大功率点向右移动，使转子运行在超速模式，从而保留一部分功率，在需要调频时可释放该部分功率参与响应。具体的超速控制如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_{del} = (1-d)P_{MPPT} \\ P_{del} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p^{del} v^3 \\ C_p^{del}(\lambda_{del}, \beta=0) = (1-d)C_p^{max}(\lambda_{opt}, \beta=0) \end{cases} \quad (3)$$

式中： P_{del} 、 d 、 C_p^{del} 与 λ_{del} 分别表示减载运行功率、减载率、减载模式下的风能利用系数和减载模式下的叶尖速比。

文献[23]统计表明，风电场一年中绝大部分时间风机均运行于额定风速以下。由于超速减载模式通常适用于额定风速以下工况，因此采用超速控制能够满足风机在大多数运行时间内的减载需求。文献[24]通过采用低减载率超速控制($d=3\% \sim 5\%$)的方式最大限度地减少正常运行时的能量损失，本文借鉴了此思路。同风速下风机的超速减载曲线与 MPPT 运行曲线如图 1 所示。其中： P_{wind} 表示风机输出有功功率； ω_r 为风机转速。

1.2 风电机调频过程

风电通过利用转子动能参与频率调节，转子运动方程^[11]表示为

$$2H_w \frac{d\omega_{r,nom}}{dt} = \frac{P_m}{\omega_{r,nom}} - \frac{P_e}{\omega_{r,nom}} \quad (4)$$

式中： P_e 表示电磁功率(单位 MW)； H_w 为风机的等效时间常数。

综合惯量控制^[18]使风电机具有惯性响应和一次频率调节能力，实际上在风机的有功功率基准

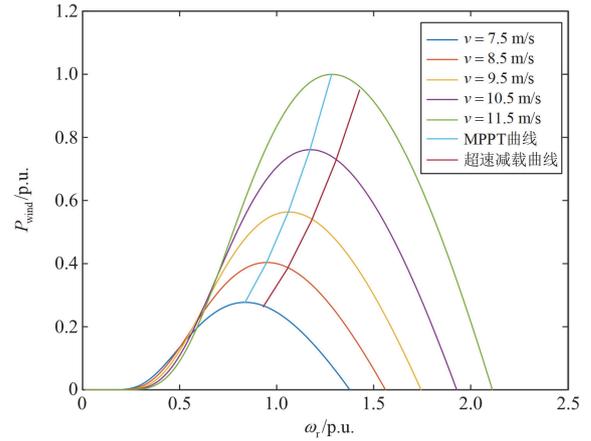


图 1 超速减载运行曲线

Fig. 1 Overspeed and load shedding operating curves

上加入一个附加功率信号 P_{add} ，表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{add} = -K_p \Delta f - K_d \frac{df}{dt} \\ P_{add} = \Delta P_{add} \cdot a \\ P_{ref} = P_{MPPT} + P_{add} \\ P_{ref,del} = P_{del} + P_{add} \end{cases} \quad (5)$$

式中： ΔP_{add} 为附加功率信号标幺值； f 为频率(单位 Hz)； Δf 为频率偏差(单位 Hz)； K_p 为下垂控制系数； K_d 为惯性响应系数； P_{ref} 、 $P_{ref,del}$ 分别为风机的电气部分在 MPPT 及超速减载模式下的功率设定值(单位 MW)； a 为基准值，保证各变量在一个数量级。

由于当前大型风机均已实现有功和无功解耦控制，在研究风电场的有功控制问题时，发电机部分可简化为一阶惯性环节^[25]。

$$\begin{cases} P_e = \frac{P_{ref}}{1 + T_a s} \\ P_{e,del} = \frac{P_{ref,del}}{1 + T_a s} \end{cases} \quad (6)$$

式中： T_a 为惯性环节的时间常数； P_e 、 $P_{e,del}$ 分别为风机在 MPPT 和减载模式下输出的电磁功率。

需要说明的是，本文风电模型内部均未做处理，但在最终的调频仿真模型中风电出力采用增量式，并与转速均进行标幺处理后输出。同时，值得注意的是，当转速符号呈现为 $\omega_{r,nom}$ 形态时，则该数据未经过标幺化处理；对于功率符号，除非文中明确标注了单位，或者包含增量符号 Δ 时，否则亦视为未进行标幺化处理。

以传统综合惯量调频过程为例，如图 2 所示，整个过程分为以下 4 个阶段。

1) 正常情况：风机以最大功率跟踪点模式运行。

2) $A \rightarrow B \rightarrow C$ 阶段: 当系统面临功率不足, 导致频率下降并突破死区界限时, 风电机组会立即增加其功率输出, 以此来支撑系统的频率稳定。在此阶段, 由于输出电磁功率 P_e 超过了机械功率 P_m , 根据式(4)可以推断, 机组转子会释放其内部储存的动能, 从而导致转子转速有所下降。

3) $C \rightarrow D$ 阶段: 当机组完成调频任务后, 会逐步减少其输出功率 P_{zeng} , 并沿着最大功率点追踪曲线(如图 2 中的红线所示)运行, 以此来恢复转子的转速, 使其功率达到某个特定的水平。

4) $D \rightarrow A$ 阶段: 随着风电机组的输出功率 P_e 低于机械功率 P_m , 转子开始吸收外部能量, 其转速逐渐恢复到最优状态。

图 2 中: $\omega_{r,nom0}$ 、 P_0 分别表示初始转子转速和功率; $\omega_{r,nomoff}$ 为退出调频时的转速; P_{zeng} 表示频率支撑结束时的功率突变量。

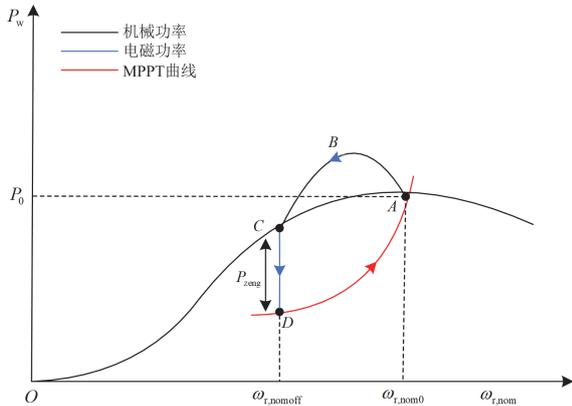


图 2 功率-转速特性曲线

Fig. 2 Power-speed characteristic curve

调频结束后, 风机需恢复至最大功率跟踪点运行, 机组在恢复转子至正常转速时需从系统中吸收能量, 这一过程会造成系统功率的暂时短缺, 从而造成新的功率失衡状态, 最终结果是系统出现 SFD, 如图 3 所示。由此可见转速恢复的重要性。

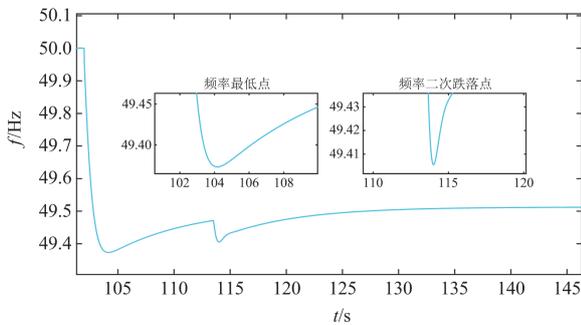


图 3 频率特性曲线

Fig. 3 Frequency characteristic curve

1.3 系统协调控制架构

风电机组通过电力电子设备接入网络, 其调整速度可达毫秒级。这使得其响应速度比火电机组更快, 在调频初期可提供更强的有功支撑, 火电机组由于具有较大的惯性时间常数, 在一次调频过程中, 火电机组应提供稳定且持续的功率支持, 而风电场则负责提供快速响应的暂时性功率补充^[26]。

根据风火调频特性, 本文提出的协调控制策略具体如图 4 所示。风电场接收到调度中心因频率下降而产生的功率缺额信息, 并获取参与调频的火电厂所提供的火电机组增加发电功率的相关信息, 承担调频响应初期的功率支撑任务, 随着火电出力的逐步增加, 功率支撑任务从风电逐步过渡至火电, 风电重新恢复至最大功率点跟踪模式运行。在风电场控制层, 通过风电转子可调频裕度来确定风电机组分担火电响应初期功率缺额的比例, 同时将调度中心产生的功率参考信号进行有序分配。当调频机组退出调频时, 将信号下发给预先采用低减载率超速运行的机组, 减载机组随即根据调频机组转速按反比例再分配备用功率, 以填补调频机组转速恢复初期的功率缺额, 从而缓解风火协同调频过程中的频率下跌现象。

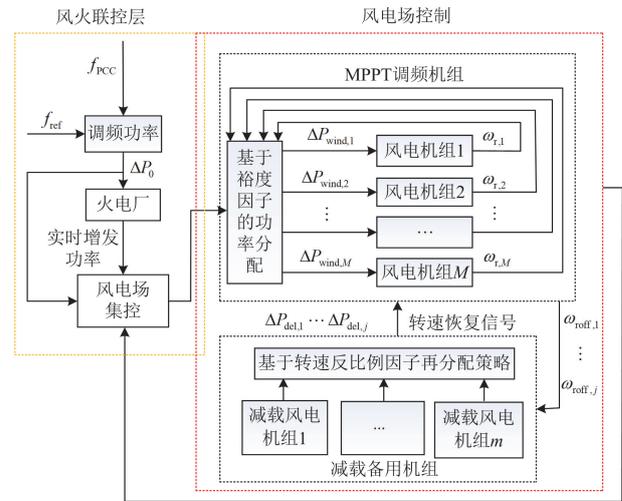


图 4 风火联合一次调频控制系统

Fig. 4 Wind-thermal coordinated primary frequency control system

2 基于调频裕度因子的功率分配策略

2.1 风电场整体参考功率

当系统受到频率扰动时, 上层调度中心通过考虑一次调频死区可以计算出系统的功率缺额 ΔP_0 , 如式(7)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_0 = -K_g(\Delta f - D) & \Delta f > D \\ \Delta P_0 = 0 & -D \leq \Delta f \leq D \\ \Delta P_0 = -K_g(\Delta f + D) & \Delta f < -D \end{cases} \quad (7)$$

式中: K_g 为系统等效的调差系数; Δf 为频率偏差, $\Delta f = f_{\text{ref}} - f_{\text{PCC}}$, 其中 f_{ref} 、 f_{PCC} 分别为频率参考值 (50 Hz)、系统公共连接点频率; D 为调频死区。

考虑实际系统功率缺额为 ΔP_0 , 火电机组的实时增发功率 $\Delta P_{\text{thermal}}$ 为

$$\Delta P_{\text{thermal}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{thermal},i} \quad (8)$$

式中: n 表示系统中参与调频的火电机组台数; $\Delta P_{\text{thermal},i}$ 表示第 i 台火电机组实时增发的功率。

根据图 4 的系统设计, 风电场参与一次调频的有功功率参考值由其自身运行状态和火电机组的功率增发情况共同决定, 从而计算出实时需要增发的功率缺额 ΔP 为

$$\Delta P = \Delta P_0 - \Delta P_{\text{thermal}} \quad (9)$$

结合实际运行情况, 风电场的最大增发功率为

$$\Delta P_{\text{wind}}^{\max} = \sum_{j=1}^M \Delta P_{\text{wind},j}^{\max} \quad (10)$$

式中: M 表示参与调频的风电机组台数; $\Delta P_{\text{wind}}^{\max}$ 表示风电场参与一次调频可以增发的最大功率; $\Delta P_{\text{wind},j}^{\max}$ 表示第 j 台风电机组可以增发的最大功率。

综上, 风电场参与一次调频实际需要增发的功率 ΔP_{wind} 为

$$\Delta P_{\text{wind}} = \begin{cases} \Delta P_{\text{wind}}^{\max} & \Delta P \geq \Delta P_{\text{wind}}^{\max} \\ \Delta P & \Delta P < \Delta P_{\text{wind}}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

2.2 风电机组级参考功率

鉴于风机转速存在安全阈值, 一旦超限可能导致风电场退出电网等严重后果。此外, 尾流效应导致风电场内各风机运行状况各异, 其频率支撑能力亦不相同。因此, 本文聚焦于风电场内风机运行状态的差异性, 通过协同各风机进行调频, 旨在充分挖掘风电场的调频潜力, 优化系统频率响应。

为确保风电机组的安全性, 风电场在调频过程中必须遵循转子转速约束^[27], 第 j 台风电机组的能量裕度因子 χ_j 构建如式(12)所示。

$$\chi_j = \begin{cases} \frac{\omega_{r\max}^2 - \omega_{r,j}^2}{\omega_{r\max}^2 - \omega_{r\min}^2} \Delta f > 0 \\ \frac{\omega_{r,j}^2 - \omega_{r\min}^2}{\omega_{r\max}^2 - \omega_{r\min}^2} \Delta f < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\omega_{r\max}$ 、 $\omega_{r\min}$ 分别为风机转速的上、下限值; $\omega_{r,j}$ 为第 j 台风机实时转子转速。

其次, 为了充分发挥不同风电机组的调频能力, 功率分配方案应当保证各风电机组所分担的不平衡

功率与其自身的频率调节裕度因子成正比关系, 并且这一比例在所有参与分配的机组中应当保持一致, 以此来达到调频资源的平衡利用, 具体如式(13)所示。

$$\frac{\Delta P_{\text{wind},1}}{\chi_1} = \dots = \frac{\Delta P_{\text{wind},j}}{\chi_j} = \dots = \frac{\Delta P_{\text{wind},M}}{\chi_M} \quad (13)$$

式中: $\Delta P_{\text{wind},j}$ 为第 j 台风机分配到的不平衡功率。

假定风电场内有 M 台风机参与一次调频, 则可以推导出风电场内各个风机消纳的不平衡功率。设裕度因子和 $\varphi = \chi_1 + \chi_2 + \dots + \chi_j + \dots + \chi_M \leq M$, 则 M 台调频风机共同承担风电场参与调频的不平衡功率为 ΔP , 按照等比例裕度因子分配原则, 各台风机所承担的功率为

$$\Delta P_{\text{wind},j} = \frac{\Delta P}{\varphi} \chi_j \quad (14)$$

由于风电不具备长期频率支撑能力, 根据文献[19]对频率支撑时间设置的要求, 本文取 $\Delta t_1 = 11.5 \text{ s}$ 。当风机完成频率支撑后需要退出调频进入转速恢复阶段, 便过渡到火电提供功率参与调频。

3 风机分组持久备用再分配转速恢复

调频风机退出频率支撑后, 需要对其进行转速恢复, 由于火电增发的迟延性, 如果转速恢复控制设置不合理, 则造成的功率缺额可能引起系统 SFD。本文提出一种风机分组持久备用再分配的转速恢复策略。

当负荷扰动发生时, 向预留的少部分机组发送一个减载因子信号, 使其在减载水平上运行。当调频机组退出频率支撑进入转子转速开始恢复阶段, 考虑到通信迟延, 延迟 200 ms 后, 向减载机组发送释放备用功率的信号, 再根据转速反比例再分配备用功率以填补调频机组转速恢复初期的能量缺额, 实现转子转速的快速平滑恢复。具体实现过程如图 5 所示。

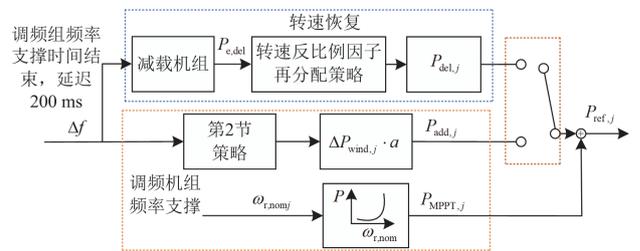


图 5 转速恢复策略

Fig. 5 Speed recovery strategy

单一减载调频会导致大量弃风, 同时借鉴文献[28]中少部分风机参与减载的思想, 本文采用风机

低减载率超速运行策略, 并设置调频机组与减载机组的比例为5:1。但备用功率 P_{del} 面对不同运行状态风机的转速恢复, 显然采用常规的分配方式并不能满足实际运行, 甚至有可能出现频率超调的现象(第4节说明)。前文频率支撑时期最大限度地发掘了转子动能, 使得风速越大的风机转速恢复需要的功率缺额越大, 基于此本文提出一种基于转速反比例因子再分配的策略。首先, 调频机组频率支撑结束后对其转速进行排序, 具体公式为

$$\omega_{\text{roff},1} < \omega_{\text{roff},2} < \dots < \omega_{\text{roff},j} \quad (15)$$

式中: $\omega_{\text{roff},j}$ 为频率支撑结束时第 j 台风机的转速。

当调频机组退出频率支撑时, 通过图5所示的方式向减载机组释放信号, 并根据式(3)计算出 P_{del} 。备用减载机组采用传统的综合惯量控制, 由式(5)得到 $P_{\text{ref,del}}$ 。进一步由式(6)得到备用减载机组的功率输出 $P_{\text{e,del}}$ 。

其次, 利用反比例因子求出各自的减载功率占比, 对减载机组的持久备用功率进行合理再分配, 实现调频风机转速的平滑恢复, 具体如下。

$$\begin{cases} \lambda_1 = 1 - k\omega_{\text{roff},j}^2 \\ \vdots \\ \lambda_j = 1 - k\omega_{\text{roff},1}^2 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_{\text{del},1} = \lambda_1 P_{\text{e,del}} \\ \vdots \\ P_{\text{del},j} = \lambda_j P_{\text{e,del}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_j = c \leq 1 \quad (18)$$

式中: λ_j 、 $P_{\text{del},j}$ 分别表示第 j 台风机转速恢复初期的反比例因子与获得的减载机组备用功率值; k 是限制值, 确保 c 不超过1。

综上, 风火联合参与一次调频的流程如下所述。

1) 当系统检测到系统频率偏差的绝对值大于死区 $D = 0.033$ Hz时, 根据式(7)计算出系统功率缺额并下发到风火联控层;

2) 结合风电调频的快速性, 根据式(8)、式(9)计算出调频初期风电场的增发功率缺额;

3) 考虑调频风机不同的运行状况, 根据式(14)计算出不同风机要承担的不平衡功率, 发掘不同风机的调频能力;

4) 经设定的频率支撑时间 Δt_1 后, 延迟200 ms, 触发备用减载机组参与调频机组的转速恢复, 按照式(16)和式(17)对备用功率进行再分配, 快速填补因火电延迟造成的转速恢复初期功率缺额, 快速平稳地实现转速恢复。

4 仿真结果与分析

为了验证本文策略的有效性和准确性, 本文在MATLAB/Simulink中构建了如图6所示的仿真模型。火电机组和系统模型的具体参数参考文献[29], 模拟了一个600 MW的火电厂G1。风电场的总装机容量为90 MW, 由60台1.5 MW的双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)组成机组(风电场内共有6台聚合风机(WT1—WT6))^[26]。风电机组参数如表1所示。本文仅考虑风电在额定风速以下运行。 L_1 为固定负荷, L_2 为可变负荷。

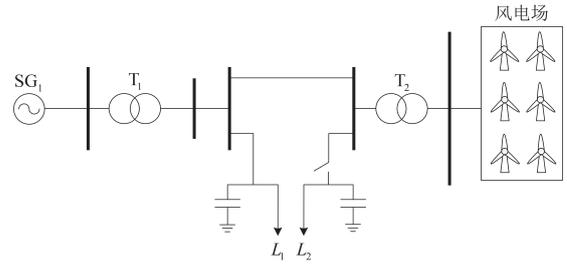


图6 仿真系统结构

Fig. 6 Simulation system structure

表1 仿真系统参数

Table 1 Simulation system parameters

火电机组及系统	详见文献[29]
	$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $R = 44 \text{ m}$, $C_1 = 0.5173$, $C_2 = 116$,
	$C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 5$, $C_6 = 21$, $T_a = 0.02$,
风电机组	$\omega_{r,\min} = 0.7 \text{ p.u.}$, $P_{\text{base}} = 1.5 \text{ MW}$, $H_\omega = 5.04$,
	$a = 1.5 \times 10^6$, $K_d = 10$, $K_p = 40$,
	$\omega_{r,\max} = 1.21 \text{ p.u.}$, $v_0 = 11.3 \text{ m/s}$,
	$v_1 \sim v_6 = 7.5 \sim 10 \text{ m/s}$ (WT1—WT6间隔 0.5 m/s)

为验证本文所提策略的有效性, 设计了两种仿真场景。

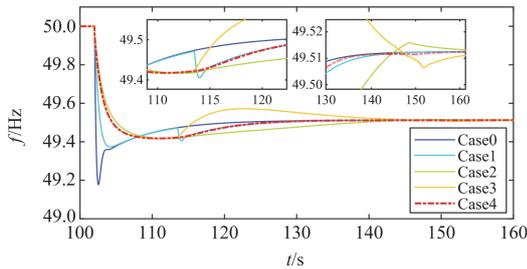
4.1 场景1

设减载机组风机WT3的风速为8.5 m/s, 减载率为 $d = 5\%$, $t = 102$ s时施加 $L_2 = 0.30$ p.u.的负荷突增。分别对比如下5种策略: Case0(风机不参与调频)、Case1(传统综合惯量控制^[18]+直接转速恢复)、Case2(基于裕度因子调频^[27]+渐进转速恢复^[19])、Case3(基于裕度因子调频+风机分组持久备用转速恢复)、Case4(本文策略)。仿真结果如图7所示。

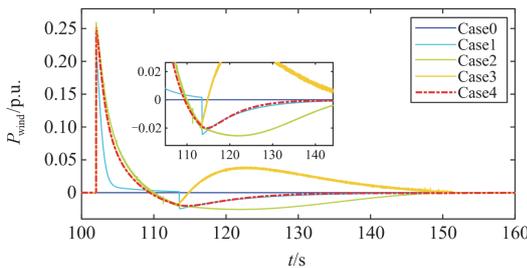
相较于Case0中风机不主动参与频率调节的情况(如图7(c)所示), Case1—Case4中火电机组的出力增长趋势均呈现出放缓的态势。在同样的调频效果下对火电爬坡速率的要求更低, 提升了高比例风电系统的频率稳定性。如图7(a)所示, 相比于风电不参与调频, 在4种策略(Case1—Case4)下的系统

频率最低点跌幅均有所减小, 详细数据见表 2。实验结果显示, 把风电纳入系统调频体系中能够有效缩减频率偏差, 并优化频率的动态响应特性。

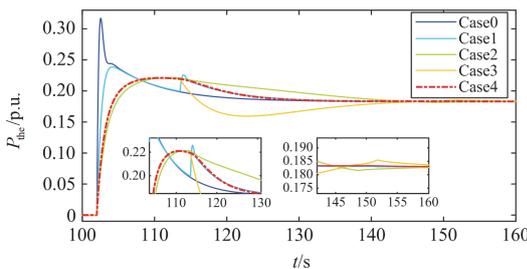
在频率支撑阶段, 结合图 7(b)所示的风电场出力情况进行分析, 本文策略充分考虑了风电机组运行状态的差异性, 使得风电场的出力相较于 Case1 有了明显增加。这一改进旨在尽可能地发掘风机的调频潜力, 从而有效降低频率的最低点 f_{FN1} 。频率支撑阶段结束后, 风机进入转速恢复时期。相较于 Case1 中直接进行转速恢复导致的明显 SFD, Case2—Case4 中的 SFD 现象均有所缓解。进一步地, 如表 2 和图 7(d)所示, 对比 Case1—Case4, 本文所提转速恢复策略相较于 Case2 在恢复时间上有了明显的缩短, 使调频风机能够更迅速地实现转速恢复, 从而使系统频率快速达到稳态(均为 49.5110 Hz)。同时, 与 Case3 中采用平均分配备用功率策略导致的频率超调现象相比(如图 7(e)所示), 本文所提策略能够根据调频风机的转速差异对备用功率进行再分配。该策略能够迅速且合理地填补转速恢复所需的能量缺口, 从而顺利过渡到火电机组出力阶段, 确保了系统的稳定运行。



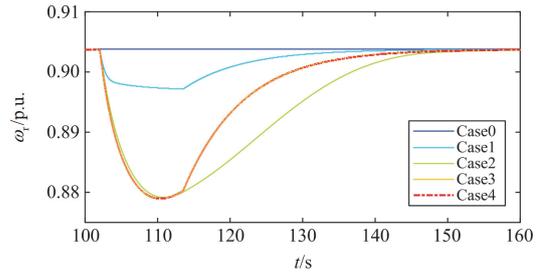
(a) 电网频率



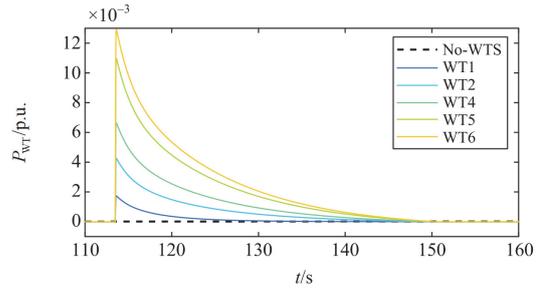
(b) 风电出力



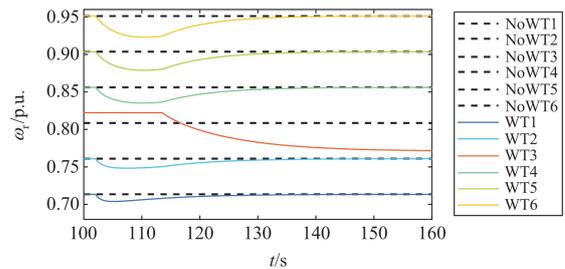
(c) 火电出力



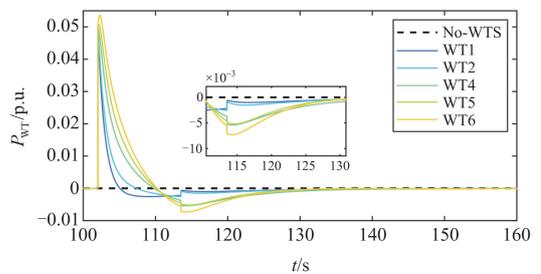
(d) 不同策略下WT5风机转速变化



(e) 本文备用减载功率再分配



(f) 本文策略下不同风机机组转速特性



(g) 本文调频策略下各风机出力

图 7 场景 1 仿真结果

Fig. 7 Simulation results for scenario 1

表 2 不同控制策略下的调频效果对比

Table 2 Comparison of frequency regulation effect with different control strategies

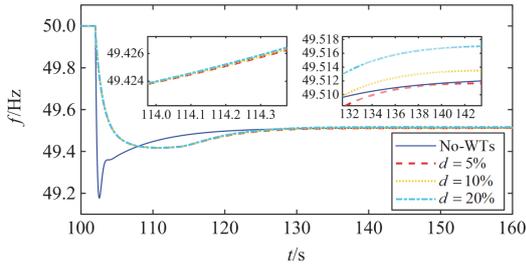
策略	f_{FN1}/Hz	二次跌落点 f_{FN2}/Hz	频率达到稳态时间/s
Case0	49.1772	—	136.385
Case1	49.3733	49.4058	140.345
Case2	49.4167	—	144.125
Case3	49.4175	—	161.730
Case4	49.4175	—	136.900

4.2 场景 2

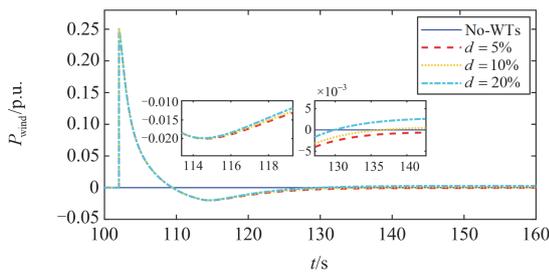
设减载机组风机 WT3 的风速为 8.5 m/s, 改变减载率 $d = 5\%$ 、 $d = 10\%$ 和 $d = 20\%$, $t = 102$ s 时施加 $L_2 = 0.30$ p.u. 的负荷突增。本策略旨在缓解仅采用高减载率运行的风机参与调频所导致的能量损失问题, 因此提出采用低减载率下的超速运行模式。场景 2 的仿真结果如图 8 所示, 验证了所提策略的可行性。

当风机处于高减载率运行状态($d = 20\%$)时, 可以观察到, 相较于采用中低减载率运行的风机, 采用高减载率运行的风机释放的能量更为显著。然而, 其调频效果并未明显优于采用中低减载率运行的风机, 甚至出现频率超调现象。此外, 长期维持高转速运行状态可能会对风机的使用寿命产生不利影响。

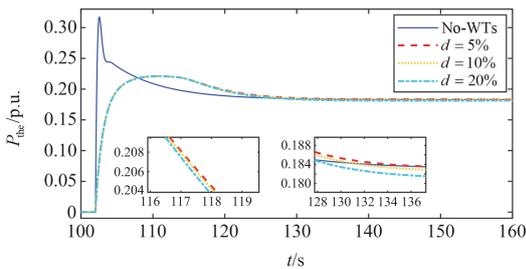
进一步对中减载率($d = 10\%$)与本文提出的低减载率($d = 5\%$)进行比较, 两者在缓解 SFD 以及调频机组转速快速恢复方面的性能表现大致相当。然而, 如图 8(e)所示, 中减载率机组在调频转速恢复过程中释放的能量多于低减载率机组, 这导致前者在转速恢复阶段仍会有一部分能量损失。



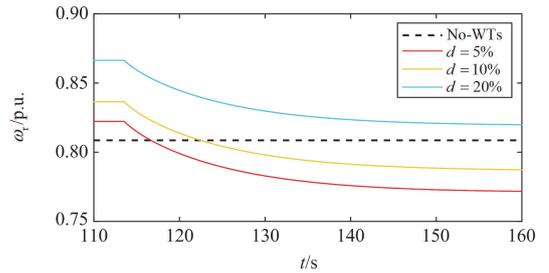
(a) 电网频率



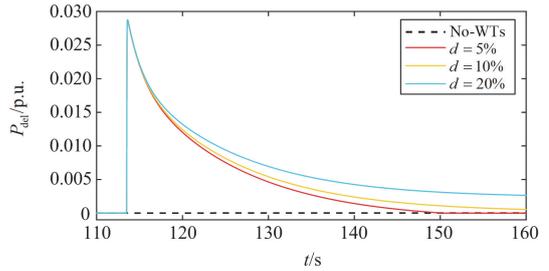
(b) 风电出力



(c) 火电出力



(d) 不同减载率的风机转速特性



(e) 不同减载率的风机出力

图 8 场景 2 仿真结果

Fig. 8 Simulation results for scenario 2

相较于采用中高减载率运行的风机, 本文采用的低减载率运行策略具有明显的优势: 转子超速幅度较小, 有效降低了对风机健康运行的影响; 在调频机组转速恢复过程中, 释放的备用能量较少, 从而能够支持风机长时间维持减载运行状态, 并具备多次参与频率调节任务的能力。

5 结论

结合风电与火电不同的调频特性, 提出一种以火电为主、风电为辅的联合调频控制系统; 考虑到风电场内风机运行的差异, 提出一种基于裕度因子的功率分配策略, 尽可能挖掘不同风机的调频能力; 调频风机退出调频进入转速恢复阶段, 考虑火电增发的延迟可能导致 SFD, 提出一种预先使少部分风机低减载率运行的持久备用再分配策略, 实现转子转速快速平稳恢复。本文策略充分发掘风电场内不同风机的调频性能, 是一种兼顾经济性与安全稳定的转速恢复策略, 保证含高比例风电的电力系统安全稳定运行, 得到主要结论如下。

1) 考虑到火电与风电不同的调频特性, 建立风火联合调频系统; 同时兼顾风电场内各风机的运行差异, 提出基于裕度因子的功率分配策略, 保证风机安全运行的前提下充分发掘不同风机的调频能力, 有效缓解频率最低点, 保证系统稳定。

2) 考虑到火电机组功率增发的延迟性可能造成 SFD, 本文提出风机分组持久备用的再分配恢复

策略。该策略差异化的备用功率分配, 保证转子转速安全快速地恢复, 有效缓解 SFD。

3) 考虑长期高减载率对风机健康运行以及能量损失的影响, 本文采用低减载率的超速运行模式, 减少弃风以及对风机寿命的影响。同时调频风机转速恢复过程中释放的备用能量较少, 能够多次参与调频任务。

本文策略仅针对额定风速工况下的调频与减载, 且在调频过程中功率分配的快速性有所牺牲。后续研究可进一步探讨全风速工况下基于快速功率分配的调频策略, 优化风机减载运行模式以提供更持久的功率备用, 使其具备更长时间尺度下的频率支撑能力, 并拓展至风机参与二次调频等相关方向。

参考文献

- [1] 钱敏慧, 张建胜, 秦文萍, 等. 计及 DFIG 调频的系统频率响应特性分析及快速频率支撑策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 58-67.
QIAN Minhui, ZHANG Jiansheng, QIN Wenping, et al. System frequency response characteristic considering DFIG frequency regulation and fast frequency response strategy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 58-67.
- [2] 马覃峰, 安甦, 刘明顺, 等. 考虑风光储调频贡献度的新型电力系统频率特性[J]. 南方电网技术, 2024, 18(11): 129-140.
MA Qinfeng, AN Su, LIU Mingshun, et al. Frequency characteristics of new power system considering the frequency modulation contribution of wind power-photovoltaic-energy storage[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(11): 129-140.
- [3] 井浩然, 施通勤, 徐秋实, 等. 风电场与多分布式变速抽水蓄能协同调频控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 125-135.
JIN Haoran, SHI Tongqin, XU Qiushi, et al. Coordinated frequency modulation control of a wind farm and multi-distributed variable speed pumped storage[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 125-135.
- [4] LI L, ZHU D, ZOU X, et al. Review of frequency regulation requirements for wind power plants in international grid codes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 187.
- [5] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定导则: GB38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Standardized Technical Committee of National Grid Operation and Control. Code on security and stability for power system: GB 38755—2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019.
- [6] 杨婷婷, 李浩千, 吴鑫彦, 等. 考虑系统运行差异的风火储协调一次调频控制策略[J]. 太阳能学报, 2025, 46(6): 430-439.
YANG Tingting, LI Haoqian, WU Xinyan, et al. Coordinated primary frequency regulation control strategy of wind-thermal-storage system considering operation difference[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2025, 46(6): 430-439.
- [7] 李腾辉, 李卫东, 申家锴, 等. 双馈风电机组利用转子动能进行一次调频能力动态估计[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 109-117.
LI Tenghui, LI Weidong, SHEN Jiakai, et al. Dynamic estimation of primary frequency regulation capability of doubly-fed wind turbines using rotor kinetic energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 109-117.
- [8] CHEN Z, SHI T, SONG P, et al. Improved pitch control strategy for the robust operation of wind energy conversion system in the high wind speed condition[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153.
- [9] 王育飞, 张文韬, 杨铭诚, 等. 考虑虚拟控制参数调节的风储联合调频优化模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 37-48.
WANG Yufei, ZHANG Wentao, YANG Mingcheng, et al. Combined wind-storage system frequency regulation optimization model predictive control considering virtual control parameter adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 37-48.
- [10] TANG Y, YANG P, YANG Y, et al. Fuzzy adaptive frequency support control strategy for wind turbines with improved rotor speed recovery[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 1351-1364.
- [11] 唐玉烽, 杨苹, 杨义. 考虑频率二次跌落的风电机组频率响应控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 166-174.
TANG Yufeng, YANG Ping, YANG Yi. Frequency response control strategy of wind turbines considering frequency secondary drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 166-174.
- [12] WANG W, KONG X, LI G, et al. Wind farm control using distributed economic MPC scheme under the influence of wake effect[J]. Energy, 2024, 309.
- [13] HANSEN A D, SØRENSEN P, IOV F, et al. Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators[J]. Renewable Energy, 2006, 31(7): 935-951.
- [14] ZHANG W, FANG K. Controlling active power of wind farms to participate in load frequency control of power systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(9).
- [15] 何廷一, 孙领, 李胜男, 等. 考虑风速差异的风电场减载方案与一次调频策略[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 139-148.
HE Tingyi, SUN Ling, LI Shengnan, et al. Research on

- deloading scheme and primary frequency regulation strategy of wind farm considering wind speed difference[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(7): 139-148.
- [16] 姚雅涵, 熊永新, 姚伟, 等. 面向电网频率快速支撑的风电场自适应分布式协调控制[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(2): 561-573.
YANG Yahan, XIONG Yongxin, YAO Wei, et al. Adaptive distributed cooperative control of wind farms for grid frequency fast support[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(2): 561-573.
- [17] 姜涛, 邱宇琛, 刘先超, 等. 多风电场支撑电网频率稳定的动态差异化时序协同控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(8): 162-173.
JIANG Tao, QIU Yuchen, LIU Xianchao, et al. Control strategy with dynamic and differentiated timing synergy for multiple wind farms supporting frequency stability of power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(8): 162-173.
- [18] 陶玉昆, 杨飞飞, 和萍, 等. 考虑频率二次跌落和转速恢复的风电机组柔性频率响应策略[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(8): 162-173.
TAO Yukun, YANG Feifei, HE Ping, et al. Flexible frequency response strategy for wind turbines considering secondary frequency drop and rotational speed recovery[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(8): 162-173.
- [19] 冀肖彤, 江克证, 姚雅涵, 等. 计及风机运行状态差异的风电场频率协同支撑控制[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(3): 98-104.
JI Xiaotong, JIANG Kezheng, YAO Yahan, et al. Frequency collaborative support control of wind farm considering operation state difference of wind turbines[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(3): 98-104.
- [20] 赵冬梅, 许瑞庆, 郑立鑫. 全风况下双馈风机参与调频的协调控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(12): 53-59.
ZHAO Dongmei, XU Ruiqing, ZHENG Lixin. Research on coordinated control strategy for DFIGs participating in system frequency regulation with different wind[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(12): 53-59.
- [21] WANG R, QIN S, BAO W, et al. Configuration and control strategy for an integrated system of wind turbine generator and supercapacitor to provide frequency support[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 154.
- [22] KESAVAN P K, SUBRAMANIAM U, ALMAKHLES D J, et al. Modelling and coordinated control of grid connected photovoltaic, wind turbine driven PMSG, and energy storage device for a hybrid DC/AC microgrid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(1): 154-167.
- [23] 王同森, 张峰, 丁磊. 考虑最优运行点的超速风电机组调频控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(6): 22-28.
WANG Tongsen, ZHANG Feng, DING Lei. Frequency regulation control strategy of over-speed wind turbines considering optimal operation point[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(6): 22-28.
- [24] BAO W, DING L, KANG Y, et al. Closed-loop synthetic inertia control for wind turbine generators in association with slightly over-speeded deloading operation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 38(6): 5022-5032.
- [25] LI X, WANG W, YE L, et al. Improving frequency regulation ability for a wind-thermal power system by multi-objective optimized sliding mode control design[J]. *Energy*, 2024, 300.
- [26] 刘吉臻, 姚琦, 柳玉, 等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(12): 3462-3469, 3674.
LIU Jizhen, YAO Qi, LIU Yu, et al. Wind farm primary frequency control strategy based on wind & thermal power joint control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(12): 3462-3469, 3674.
- [27] 曹俊英, 姚骏, 黄森, 等. 基于裕度因子的多风电场站集群频率协调控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(3): 105-112.
CAO Junying, YAO Jun, HUANG Sen, et al. Frequency coordination control strategy of multi-wind farm cluster based on margin factor[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(3): 105-112.
- [28] CHENG Y, SUN H, ZHANG Y, et al. A consecutive power dispatch in wind farms to mitigate secondary frequency dips[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 158.
- [29] 何林轩, 李文艳. 飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1679-1686.
HE Linxuan, LI Wenyang. Simulation of the primary frequency modulation process of thermal power units with the auxiliary of flywheel energy storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1679-1686.

收稿日期: 2024-11-08; 修回日期: 2025-02-14

作者简介:

杨婷婷(1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为发电机组节能优化控制; E-mail: yangtingting@ncepu.edu.cn

徐永强(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电参与系统频率调节优化控制; E-mail: 17726579663@163.com

李浩千(1999—), 男, 硕士, 研究方向为风火打捆外送系统稳定特性分析与优化。

(编辑 魏小丽)