

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241165

基于风电可用转子动能评估的频率支撑需求优化分配策略

朱元振¹, 苗伟威², 鲍冠南², 赵桂芳³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院/山东省智能电网技术创新中心, 山东 济南 250000; 2. 国网山东省电力公司电力调度控制中心, 山东 济南 250000; 3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 随着风电在电力系统中的占比不断提高, 同步机惯量和调频能力不断降低, 风电提供频率支撑是保证电力系统安全运行的必然选择。然而, 风电天然的出力波动特性决定了其频率支撑能力时变, 加之系统在不同运行方式下的频率支撑需求不同, 如何在不同系统运行方式下为不同频率支撑能力的风电机组分配频率支撑需求成为一项难题。提出一种基于风电可用转子动能评估的频率支撑需求优化分配策略。在风电机组采用释放转子动能方式提供频率支撑的场景下, 首先基于其风电功率捕获特性解析推导了频率支撑期间的风能损失, 得到了风电可用转子动能的精确表征方法。然后, 结合电网实际运行场景, 基于系统频率安全判据, 提出了一种系统对风电频率支撑总体需求的评估方法。最后, 以风能损失最小为目标, 提出了频率支撑需求在风电机组间的优化分配策略。仿真结果表明, 所提方法能够在保证系统频率安全的同时, 显著降低风电频率支撑期间的风能损失。

关键词: 风电; 可用转子动能; 频率支撑能力; 风能损失; 优化分配

Optimal allocation strategy of frequency support demand based on assessing wind power available rotor kinetic energy

ZHU Yuanzhen¹, MIAO Weiwei², BAO Guannan², ZHAO Guifang³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company / Shandong Smart Grid Technology Innovation Center, Jinan 250000, China; 2. Power Dispatch Control Center, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, China; 3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: As the penetration of wind power in power systems continues to rise, the inertia and frequency regulation capability provided by synchronous machines are gradually diminishing. This makes frequency support from wind power a necessary measure to ensure the secure operation of power systems. However, due to the inherent variability of wind power output, its frequency support capacity is time-varying. In addition, frequency support requirements differ under various system operating conditions, making it challenging to allocate frequency support tasks for wind turbines with different support capabilities under different scenarios. This paper proposes an optimal allocation strategy for frequency support requirements based on the evaluation of the available rotor kinetic energy of wind power. In scenarios where wind turbines release stored rotor kinetic energy to provide frequency support, an analytical expression for wind energy loss during frequency support is derived first based on the wind power capture characteristics, allowing accurate quantification of the available rotor kinetic energy. Subsequently, considering the actual power system operation conditions and system frequency security criteria, a method is proposed to assess the overall frequency support requirement for wind power. Finally, with the goal of minimizing wind energy loss, an optimal allocation strategy for frequency support demand among wind turbines is proposed. Simulation results show that the proposed method significantly reduces wind energy loss during frequency support while ensuring system frequency security.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B20101).

Key words: wind power; available rotor kinetic energy; frequency support capacity; wind energy loss; optimal allocation

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (U22B20101); 国网山东省电力公司科技项目资助 (2023A-006)

0 引言

“双碳”目标驱动下,我国能源电力低碳转型已成为必然趋势^[1-3],风电并网容量和发电量占比在电力系统中不断提高,风电正逐渐成为电力系统的主体电源之一^[4]。为了追求风能利用的最大化,风电机组一般采用最大功率追踪^[5](maximum power point tracking, MPPT)控制。然而此种控制方式下,风电机组不预留调频备用容量,无法在系统频率变化时通过释放调频备用提供频率支撑^[6]。此外,由于风电机组通过变流器并网,其转速与系统频率解耦,因此无法对系统频率变化做出自发响应^[7-8]。风电缺乏对系统频率的支撑能力,导致大规模风电并网电力系统的惯量降低^[9]、一次调频能力减弱,系统难以仅仅依靠数量不断减少的同步发电机来保障在严重有功扰动下的频率安全。因此,使风电具备一定的频率支撑能力成为高比例风电系统安全运行的必然选择。

近年来,有不少学者针对风电频率支撑进行了大量研究,提出的方法主要可分为两类:1) 减载控制方式^[10],主要原理是在不同风速下令风电机组通过超速或桨距角动作,使其正常运行时偏离最大功率点,从而保留部分功率备用,用于提供频率支撑;2) 基于转子动能释放的惯量控制^[11-12],主要原理是在系统发生扰动后,提升风电机组输出电磁功率,将风电机组转子中存储的一部分旋转动能释放到系统中,用于提供频率支撑。两种方法各有优劣,惯量控制不改变风电机组正常运行时的控制方式,不影响风电场正常运行的经济性,但由于转子动能有限,因此只能提供短时频率支撑;减载控制能够提供持续的频率支撑,但由于其要求风电机组长时期功率运行,风电场往往难以承受正常运行期间因偏离最大功率点、损失风能捕获造成的经济损失。因此,通过释放转子动能向系统提供频率支撑的惯量控制方法成为风电频率支撑的主流方法。

然而,惯量控制方法的应用仍然存在一些亟待解决的问题。由于风电功率的波动性和不确定性,风电机组转速与其储存的转子动能始终处于波动状态,导致风电机组的频率支撑能力具有时变性;同时,系统运行方式变化会带来风电渗透率的变化,导致系统对风电提供频率支撑的总体需求也处于动态变化的状态^[13];因此,在风电机组频率支撑能力、系统频率支撑需求的双重波动下,系统发生严重扰动后,如何计算系统对风电频率支撑的总体需求,并令其不同运行状态、不同支撑能力的风电机组之间实现合理分配成为一项难题。文献[14]在风电

参与调频之前,进行风电场一次调频能力评估。文献[15]提出了计及风电机组转子转速动态变化的一次调频简化解析模型,可快速分析风速波动对风电机组一次调频能力的影响。文献[16]从能量视角出发,分别从转子动能和功率备用两个角度对风电机组的调频能力进行评估。对于频率支撑需求在风电机组间的分配问题,文献[17]提出了一种避免频率二次跌落的风电场一次调频功率分配方法。文献[18]提出了一种基于分层架构的风电场参与电网一次调频的控制策略。文献[19]对风电场进行单机等值,构建了一种基于风电机组转子动能的风电场一次调频功率分配优化模型。文献[20]提出了一种适用于多风电场协同参与系统调频的分层惯量控制框架。以上研究为实现风电频率支撑能力的高效利用提供了重要理论依据,但大多是基于“系统频率支撑总体需求确定”这一前提条件开展的研究,对系统频率支撑需求和风电频率支撑能力的双重波动下提出机组间频率支撑能力优化分配策略的研究相对较少,并且在计算风电机组频率支撑能力时,一般直接以可释放转子动能为依据,但并未充分考虑风电转子动能释放期间,因风电机组偏离了最大功率点造成的额外风能损失^[21],因此对频率支撑能力的评估结果也欠准确。

针对以上问题,本文提出了一种基于风电可用转子动能评估的频率支撑需求优化分配策略,在风电机组采用释放转子动能方式提供频率支撑的场景下,首先基于其风电功率捕获特性解析推导了频率支撑期间的风能损失,得到了风电可用转子动能的精确计算方法,以表征风电频率支撑能力,提升了能力评估的准确性。然后,结合电网实际运行场景,基于系统频率安全判据,提出了一种系统对风电频率支撑总体需求的评估方法,实现了系统频率支撑需求和风电频率支撑能力的动态评估。最后,以风能损失最小为目标,提出了频率支撑需求在不同运行状态的风电机组间的优化分配策略,实现了频率支撑需求的合理分配,有效降低了风电频率支撑期间的风能损失。

1 风电频率支撑特性分析

1.1 风电机组建模

风力机是风力发电能量转换过程中的首个环节,它通过叶片捕获风能,并将其中的一部分转化为机械能。风力机实际捕获机械功率 P_w 为

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (1)$$

式中： ρ 表示空气密度； A 表示风机叶片扫过的面积； v_w 表示风速； C_p 表示风能利用系数^[22]， C_p 与叶尖速比 λ 和桨距角 β 有关，具体关系表示为

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \\ \lambda = \frac{\omega_r \times R}{v_w} \end{cases} \quad (2)$$

式中： ω_r 表示风机转速； R 表示风轮半径。叶尖速比 λ 为风机叶片尖端的线速度与风速之比。

为捕获最大风能，风机在正常工况下处于 MPPT 运行模式，此时 β 为 0° 。机械功率与转速的关系为复杂的非线性关系。当风机运行在启动区、恒转速区和恒功率区时，处于保护状态，不参与调频。对于风电机组参与调频期间的分析，仅关注最优转速和最低转速区间内的机械功率变化，最优转速和最低转速对应的功率点分别为 $(\omega_{r, \text{opt}}, P_{\text{opt}})$ 和 $(\omega_{r, \text{min}}, P_{\text{min}})$ 。为简化分析，采用二次函数对 $[\omega_{r, \text{min}}, \omega_{r, \text{opt}}]$ 区间内的机械功率曲线进行拟合^[23]。取 $(\omega_{r, \text{opt}}, P_{\text{opt}})$ 作为二次函数的顶点，曲线经过点 $(\omega_{r, \text{min}}, P_{\text{min}})$ ，拟合后的机械功率曲线 $P_w(\omega_r)$ 为

$$\begin{cases} P_w(\omega_r) = -k_q(\omega_r - \omega_{r, \text{opt}})^2 + P_{\text{opt}} \\ k_q = \frac{P_{\text{opt}} - P_{\text{min}}}{(\omega_{r, \text{opt}} - \omega_{r, \text{min}})^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中： k_q 为二次项系数， k_q 恒大于 0。与直线拟合相比，采用二次函数拟合提高了对 $[\omega_{r, \text{min}}, \omega_{r, \text{opt}}]$ 区间内机械功率的计算精度。

风电机组采用变桨变速控制模式，即低风速运行时变转速，追求最大风能利用系数 $C_{p, \text{max}}$ ，风能利用率较高；高风速时桨距角变化，限制功率。机侧变流器通常采用最大功率跟踪控制，桨距角为 0° 时，不同风速下存在不同的最优叶尖速比 λ_{opt} 和不同的 $C_{p, \text{max}}$ 。为了最大效率地利用风能，风电机组正常运行时处于 MPPT 控制模式，其输出功率 P_c 等于其当前风速下捕获的最大输入功率 P_{MPPT} 。MPPT 控制的数学表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{MPPT}}(\omega_r) = k_{\text{opt}} \omega_r^3 \\ k_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \rho A C_{p, \text{max}} \left(\frac{R}{\lambda_{\text{opt}}} \right)^3 \end{cases} \quad (4)$$

1.2 频率支撑控制策略

风电机组通过释放转子动能参与调频通常采用在 MPPT 功率指令基础上附加调频指令 ΔP_{re} 来实现，调频期间的转子运动方程为

$$J \omega_r \frac{d\omega_r}{dt} = P_w(\omega_r) - (P_c(\omega_r) + \Delta P_{\text{re}}) \quad (5)$$

式中： J 表示风机的转动惯量。

为减小频率的二次跌落，本文采用一种综合惯量控制策略调节风机的输出功率-时间曲线参与系统频率支撑，首先在 $t = t_0$ 时刻扰动发生时瞬时提升风机输出功率出力为 $P_{c0} + \Delta P_{\text{sw}}$ ，其中： P_{c0} 为风机初始输出功率； ΔP_{sw} 为初始输出功率突变幅值，风机转速开始下降。在 $t = t_{\text{slope}}$ 时刻结合给定斜率 k_{slope} 的斜坡惯量控制，风机转速继续降低。在 $t = t_{\text{off}}$ 时刻风机退出调频，输出功率曲线切换到 MPPT 功率曲线上，风电机组转速开始恢复。频率支撑效果的影响因素主要为 ΔP_{sw} ，改变退出调频的策略可以在基本不影响频率支撑效果的前提下，显著减小频率的二次跌落程度。为方便决策分析，假定 $t_{\text{slope}} - t_0 = 5 \text{ s}$ ， $t_{\text{off}} - t_{\text{slope}} = 10 \text{ s}$ 。综合惯量控制下风机输出功率-时间变化曲线如图 1 所示。

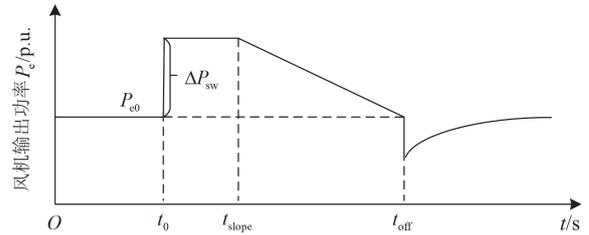


图 1 综合惯量控制下风机输出功率-时间变化曲线
Fig. 1 Wind turbine output power-time variation curve under integrated inertia control

1.3 风电机组频率支撑特性分析

当风电机组释放转子动能参与调频时，风电机组将因转速下降而偏离 MPPT 运行点，捕获的机械功率降低，从而产生风能损失。同时由于风电机组转速存在转速安全范围，当运行风速较低或者 ΔP_{sw} 较大时，会出现转速低于最低转速 $\omega_{r, \text{min}}$ 、风电机组将触发转速保护而退出调频的情况。

为了兼顾风电机组运行的稳定性和经济性，需要对不同风速下风机参与调频期间的可用转子动能进行评估，同时还需考虑风能损失的影响。在 Matlab 中以额定容量为 4.87 MW 的单台风机、运行风速为 10 m/s 的场景为例进行仿真。图 2 为风机以不同 ΔP_{sw} 参与调频期间的转速-时间变化曲线。

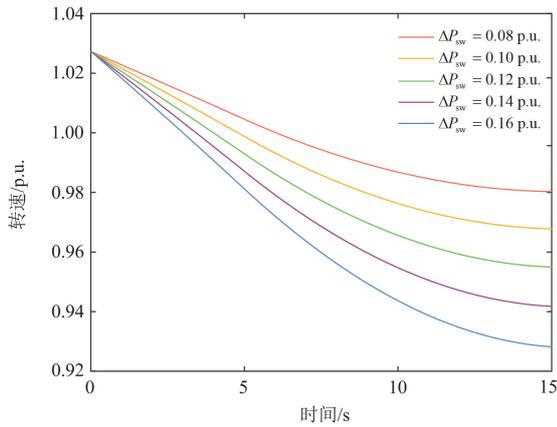


图 2 频率支撑期间风机转速-时间变化曲线

Fig. 2 Wind turbine speed-time variation curve during frequency support period

图 3 为频率支撑期间风机输出功率-转速的变化曲线, 其中黑色直线的数值为 P_{e0} , 由图可知, 随着 ΔP_{sw} 的增加, 调频结束后风机转速下降得越多, 转子动能释放越多。根据图 1 对风机输出功率进行调节, 退出调频时的输出功率均为 P_{e0} 。同时斜坡惯量控制阶段会显著减缓风机转速的下降程度。 $\Delta P_{sw} = 0.08$ p.u. 时, 风机由于转速下降释放的转子总动能为 3.9822 MJ, 而风机输出功率随时间的积分经过计算为 3.8891 MJ; $\Delta P_{sw} = 0.10$ p.u. 时, 风机释放的转子总动能为 5.0093 MJ, 而风机输出功率随时间的积分经过计算为 4.8614 MJ。由此可知, 风机释放的转子总动能并不完全参与频率支撑, 有一部分体现在由于风机输入机械功率下降造成的风能损失。

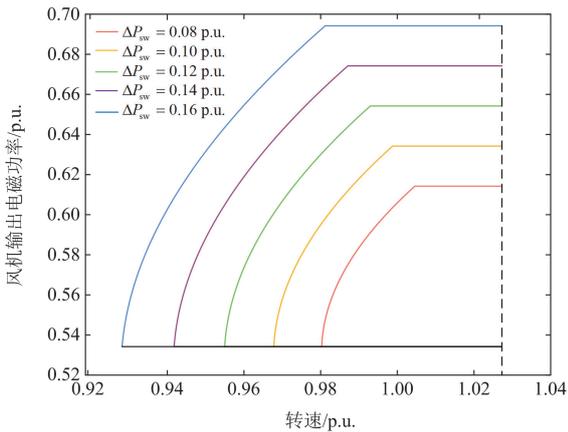


图 3 频率支撑期间风机输出功率-转速变化曲线

Fig. 3 Wind turbine output power-speed variation curve during frequency support period

图 4 为频率支撑期间风机输入功率-时间变化曲线, 其中黑色直线代表风机 MPPT 运行的初始输入

机械功率 P_{w0} , 灰色阴影区域代表 $\Delta P_{sw} = 0.08$ p.u. 时的风能损失, 经过计算为 0.0931 MJ, 黄色阴影区域代表 $\Delta P_{sw} = 0.10$ p.u. 时比 $\Delta P_{sw} = 0.08$ p.u. 时增加的风能损失, 黄色阴影区域与灰色阴影区域之和为 $\Delta P_{sw} = 0.10$ p.u. 时的总风能损失, 经过计算为 0.1479 MJ。

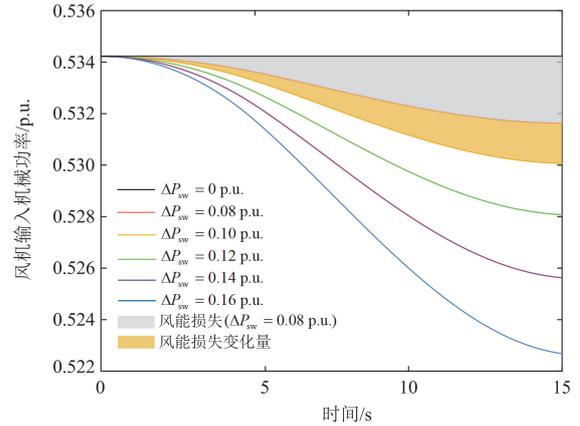


图 4 频率支撑期间风机输入功率-时间变化曲线

Fig. 4 Wind turbine input power-time variation curve during frequency support period

结合图 3 与图 4 可知, 随着 ΔP_{sw} 的不断增大, 相同时间内风机转速下降越快, 风机输入的机械功率下降越多, 风能损失越大。同时可以直观地看出, 随着时间的增加, 风能损失会陡然增大, 因此量化研究频率支撑期间的风能损失对风机运行的经济性和稳定性有重要意义。

2 可用转子动能评估

2.1 可用转子动能定义

在 MPPT 运行区间内不预留备用的情况下, 风电机组仅通过释放转子动能参与调频。参与调频后, 在转速下降阶段, 风电机组转速从调频初始时刻的 $\omega_r(t_0)$ 下降至 $\omega_r(t_{off})$ 。在此期间释放的转子总动能 $E_k(t)$ 为

$$E_k(t) = \frac{1}{2} J (\omega_r(t_0)^2 - \omega_r(t_{off})^2) \quad (6)$$

参与调频期间, 风机转速下降, $P_w(\omega_r)$ 减小, 即 $P_w(\omega_r)$ 小于 P_{w0} , 定义调频期间风机捕获功率小于初始捕获机械功率的负增量部分 ΔP_{loss} 为风能捕获损失的机械功率, 表示为 $\Delta P_{loss} = P_w(\omega_r) - P_{w0}$, ΔP_{loss} 恒小于等于 0, 结合 $P_w(\omega_r)$ 的拟合函数, 可得到 ΔP_{loss} 的具体表达式为

$$\Delta P_{loss}(\omega_r) = -k_q (\omega_r - \omega_{r,opt})^2 \quad (7)$$

定义 ΔP_{loss} 在转速下降时间内的积分为风机捕获机械功率损失的能量 E_{loss} , 即

$$E_{\text{loss}} = \int_{t_0}^{t_{\text{off}}} |\Delta P_{\text{loss}}(t)| dt = \int_{t_0}^{t_{\text{off}}} -k_q [\omega_r(t) - \omega_{r,\text{opt}}]^2 dt \quad (8)$$

将 ΔP_{re} 在参与频率支撑时间内的积分定义为支撑频率的有效能量即可用转子动能 E_{re} 。根据图 1, E_{re} 的具体表达式为

$$E_{\text{re}} = \int_{t_0}^{t_{\text{slope}}} \Delta P_{\text{sw}} dt + \int_{t_{\text{slope}}}^{t_{\text{off}}} [\Delta P_{\text{sw}} + k_{\text{slope}}(t - t_{\text{slope}})] dt \quad (9)$$

释放转子总动能、可用转子动能和风能捕获损失存在如式(10)所示的等式关系。

$$E_{\text{re}} = E_k - E_{\text{loss}} \quad (10)$$

2.2 风能损失评估

以额定容量为 4.87 MW、额定转速为 1.1 rad/s 的单台风机为例。针对图 1 所示调频控制策略, 频率支撑时间设定为 0~15 s, 以 ΔP_{sw} 和风速 v_w 分别在 0~0.72 p.u. 和 8~12.5 m/s 的范围内变化为例, 研究参与频率支撑期间 E_{loss} 与 ΔP_{sw} 、 v_w 的关系, 如图 5 所示。 v_w 一定的情况下, 随着 ΔP_{sw} 的增加, E_{loss} 也增加, 并且增加速度变快。在 ΔP_{sw} 到达某一定值会触发风机的转速保护机制, 提前退出调频。 ΔP_{sw} 一定的情况下, E_{loss} 与 v_w 的关系为非线性的复杂关系。

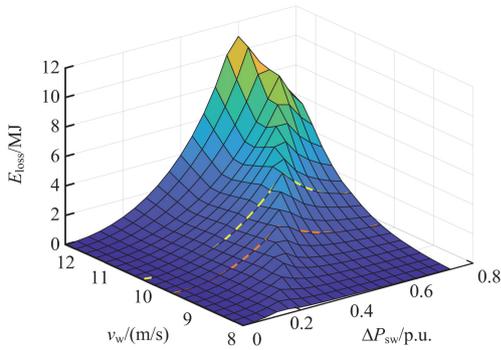


图 5 E_{loss} 与 ΔP_{sw} 、 v_w 的三维关系图

Fig. 5 Three-dimensional diagram of E_{loss} versus ΔP_{sw} and v_w

通过二次函数拟合方法, 得到运行在风速 v_{wi} 下风电机组 i 的风能损失 $E_{\text{loss}i}$ 与本文所提控制策略下最优频率支撑功率 $\Delta P_{\text{sw}i}$ 的函数关系, 表达式为

$$\begin{cases} E_{\text{loss}i} = n_{2i} \Delta P_{\text{sw}i}^2 + n_{1i} \Delta P_{\text{sw}i} + n_{0i} \\ 0 \leq \Delta P_{\text{sw}i} \leq \Delta P_{\text{sw} \max i}, v_w = v_{wi} \end{cases} \quad (11)$$

式中: n_{2i} 、 n_{1i} 、 n_{0i} 分别为不同风速下的二次系数、一次系数和常系数; $\Delta P_{\text{sw} \max i}$ 为风电机组 i 在本文所提控制策略下能够提供的最大频率支撑功率, 在图 5 中表示为每一风速曲线上的转折点。风速为 9.75 m/s 和 10.5 m/s 的场景下的二次函数拟合效果

分别如图 5 中红色虚线和黄色虚线所示。

3 风电频率支撑需求评估方法与分配策略

3.1 系统 SFR 模型

传统的仅含有同步发电机的电力系统在有功扰动下的频率响应可以使用经典的低阶系统频率响应 (system frequency response, SFR) 模型来计算, 其基本思路是假设电力系统的频率变化可以等效为一台包含再热式汽轮机和调速系统的等值同步发电机的转速变化^[24]。可将风电参与调频期间的有功出力变化表示为单独的控制环节, 将其与 SFR 模型结合, 并以此分析风电接入对系统频率响应的影响, 如图 6 所示, 其中: ΔP_{e0} 为发生扰动功率; ΔP_m 为火电机组提供的机械功率增量; $\Delta P_{\text{sw all}}$ 为风电机组提供的系统频率支撑总功率。不考虑其他类型机组参与调频, 结合省级电网实际运行参数和实际装机类型占比来拟合系统 SFR 模型参数的标么值, 模型参数如表 1 所示。

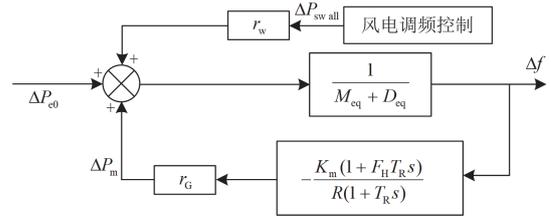


图 6 风电参与调频的 SFR 模型

Fig. 6 SFR model of wind power participation in frequency regulation

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

机组	参数	数值
火电	高压涡轮总功率比例 F_H	0.3434
	再热时间常数 T_R/s	9.95
	机械功率增益系数 K_m	1
	调差系数 R_{eq}	0.05
系统	风电渗透率 $r_w/\%$	12.3
	火电渗透率 $r_G/\%$	55.8
	等值惯量 M_{eq}/s	8.166 74
	等效阻尼系数 D_{eq}	1

3.2 风电频率支撑需求评估

根据 SFR 模型, 扰动发生后的系统频率偏差为

$$\Delta f(t) = \frac{RP_d}{DR + r_G K_m} [1 + \alpha e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi)] \quad (12)$$

式中: D 为阻尼系数; P_d 为模型输入扰动功率; 自然振荡频率 ω_n 、阻尼比 ζ 、阻尼频率 ω_d 和系数 α 、

ϕ 是根据 SFR 模型参数计算得出的, 可参见文献 [24](其中的 K_m 替换为 $r_G K_m$)。在频率最低点, 频率偏差的导数应为 0, 可以得到系统频率最低点 Δf_{\min} 的计算公式为

$$\begin{cases} \Delta f_{\min} = \frac{RP_d}{DR + r_G K_m} \left(1 + \alpha e^{-\zeta \omega_n t_{\min}} \sqrt{1 - \zeta^2}\right) \\ t_{\min} = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \left(\frac{\omega_d T_R}{\zeta \omega_n T_R - 1} \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_d 的表达式为

$$P_d = \Delta P_{e0} - \frac{\Delta P_{sw \text{ all}} \times (r_w + r_G)}{r_G} \quad (14)$$

风电机组需要提供的系统频率支撑总功率为

$$\Delta P_{sw \text{ all}} = \frac{\Delta P_{e0} - P_d}{r_w + r_G} \times r_G \quad (15)$$

分别以频率最低点 $\Delta f_{\min} = -0.5 \text{ Hz}$ 和 $\Delta f_{\min} = -0.3 \text{ Hz}$ 为限制, 在 SFR 系统模型其他参数不变的情况下, $\Delta P_{sw \text{ all}}$ 与 ΔP_{e0} 和风电渗透率 r_w 的三维关系如图 7 所示, 此处功率标幺值的基值为系统总额定容量。

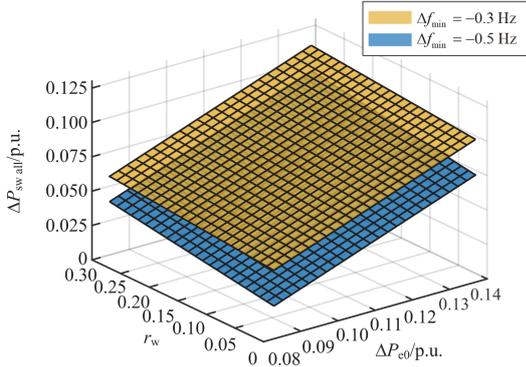


图 7 $\Delta P_{sw \text{ all}}$ 与 r_w 、 ΔP_{e0} 的三维关系图

Fig. 7 Three-dimensional diagram of $\Delta P_{sw \text{ all}}$ versus r_w and ΔP_{e0}

其中上半平面和下半平面分别代表 $\Delta f_{\min} = -0.3 \text{ Hz}$ 时和 $\Delta f_{\min} = -0.5 \text{ Hz}$ 的 $\Delta P_{sw \text{ all}}$ 与 ΔP_{e0} 和 r_w 的三维关系, 可以看到, 随着 r_w 和 ΔP_{e0} 的增加, $\Delta P_{sw \text{ all}}$ 越大, 验证了高风电渗透率大扰动场景下, 风电机组参与系统频率支撑的必要性。根据图 7, 可以在已知风电渗透率和扰动功率的条件下, 得到系统对风电机组频率支撑功率的总需求。

3.3 风电频率支撑需求分配策略

在得到风电机组对系统频率支撑的总需求后, 当不同风速下风电机组的风能损失具有相同的微增率时, 风电机组的整体风能损失将最小, 并可据此实现不同风速下风电机组的频率支撑功率分配。

类似火电机组调频功率分配的等耗量微增率方

法, 在正常 ΔP_{sw} 范围内, 风能损失微增率是随着 ΔP_{sw} 的增加而变大的。数学推理证明, 当每台风机的风能损失微增率相同时, 风电机组总风能损失 $E_{\text{loss all}}$ 达到最小。根据此原则, 结合式(16), 可以实现不同风速下风电机组调频功率的分配。

$$\begin{cases} \frac{dE_{\text{loss}i}}{d\Delta P_{swi}} = 2n_{2i}\Delta P_{swi} + n_{1i} \\ \frac{dE_{\text{loss}i}}{d\Delta P_{swi}} = \frac{dE_{\text{loss}i}}{d\Delta P_{sw1}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n \Delta P_{swi} = \Delta P_{sw \text{ all}} \\ 0 \leq \Delta P_{swi} \leq \Delta P_{sw \text{ max}i} \end{cases} \quad (16)$$

在上述提到的控制策略下, 根据图 5, 结合风能损失和调频效果选择 ΔP_{swi} 为 0~0.315 p.u.(以下均以风电机组额定容量为功率基值)。如果系统扰动功率过大, 初步分配结果超出了某一风电机组频率支撑功率 ΔP_{swi} 的边界即 $\Delta P_{sw \text{ max}i}$, 可以修正该机组的频率支撑功率为边界值, 剩余频率支撑功率需求再在其他机组中按照式(11)进行优化分配。

结合上述研究, 通过式(15)和图 7 可以在已知风电渗透率和扰动功率的条件下, 得到满足频率最低点限制下的 $\Delta P_{sw \text{ all}}$, 保存在数据库中。对不同风速下的风电机组可用转子动能及风能损失进行评估, 得到式(11)中的具体系数 n_{2i} 、 n_{1i} 、 n_{0i} 和 $\Delta P_{sw \text{ max}i}$ 并保存在数据库中。假定在每个调度周期(5 min)内都能实现风速预测并每 1 min 更新一次。在线运行期间, 系统频率会被持续监控^[25]。当监测到频率扰动事件时, 根据数据库得到风电机组参与频率支撑总需求, 再根据式(16)进行需求的优化分配, 以确保频率最低点高于指定阈值, 整体流程图如图 8 所示,

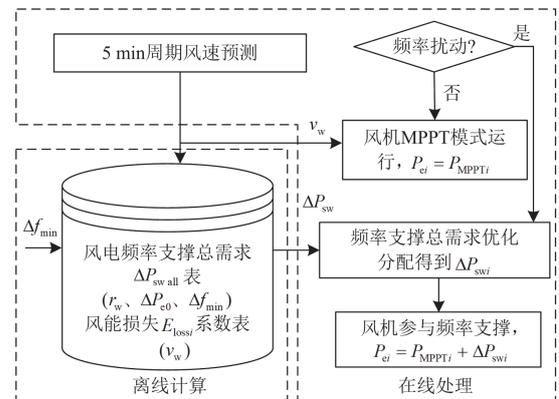


图 8 风电机组参与频率支撑流程图

Fig. 8 Flow chart of wind turbine participation in frequency support

图中： P_{MPPTi} 和 P_{ei} 分别为风电机组 i 初始运行 MPPT 点对应的输出功率和参与频率支撑时的输出功率。

4 仿真分析

4.1 仿真验证

在 DIgSILENT/PowerFactory 软件中建立系统模型，包括 3 个风速下的风机集群 WF1、WF2、WF3 以及 1 台同步发电机 SG1 模拟火电厂，1 台同步发电机 SG2 模拟剩余其他类型的发电厂，参数设置参考表 1。仿真系统结构示意图如图 9 所示。

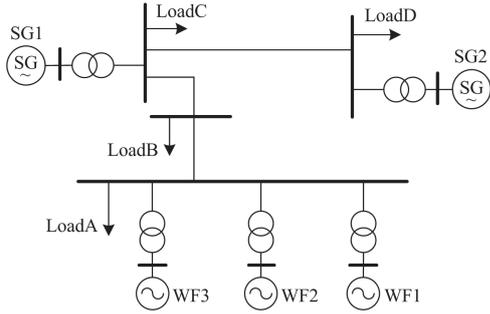


图 9 仿真系统结构示意图

Fig. 9 Simulation system structure schematic

分别按照以下 3 种分配策略模拟风电机组参与系统频率支撑。策略 1：3 个风电机组平均分配频率支撑需求；策略 2：3 个风电机组根据初始运行点加权分配频率支撑需求；本文风电机组采用最大风能追踪控制，风速越大，风机初始运行的转速越大，可释放的转子动能越多，频率支撑能力越强，频率支撑需求在 3 个风电机组之间的加权分配权重系数即为 P_{MPPTi} ，式(17)为策略 2 的表达式。

$$\Delta P_{swi} = \Delta P_{sw\ all} \times \frac{P_{MPPTi}}{\sum_{i=1}^n P_{MPPTi}} \quad (17)$$

策略 3：3 个风电机组根据上述提出的优化方法分配频率支撑需求。

4.2 仿真结果

场景 1：假设负载 B 处发生突增 53% 的有功扰动，9 m/s、10 m/s、11 m/s 这 3 个风速下的风电机组参与频率支撑。不同策略下风电机组频率支撑功率设定如表 2 所示。图 10 显示了系统频率响应对比图。在没有风电机组参与频率支撑的情况下，系统频率最低点为 49.36 Hz。风电机组参与频率支撑将频率最低点限制在 49.7 Hz 时， $\Delta P_{sw\ all}$ 为 0.5447 p.u.，但此时系统频率二次跌落严重。在频率最低点限制为 49.5 Hz 的情况下， $\Delta P_{sw\ all}$ 为 0.2322 p.u.，且系统频率二次跌落程度较轻。

表 2 场景 1 风电机组频率支撑功率设定

Table 2 WTGs frequency support power setting in Scenario 1

频率最低点	序号	分配策略	ΔP_{swi} /p.u.	v_w /(m/s)
$\Delta f_{min} = -0.5$ Hz	1	平均分配	WF1 0.077 42	9
		WF2 0.077 42	10	
		WF3 0.077 42	11	
	2	加权分配	WF1 0.055 33	9
		WF2 0.075 89	10	
		WF3 0.101 02	11	
$\Delta f_{min} = -0.3$ Hz	3	优化分配	WF1 0.072 76	9
		WF2 0.077 91	10	
		WF3 0.081 59	11	
	4	优化分配	WF1 0.176 94	9
		WF2 0.188 66	10	
		WF3 0.207 78	11	

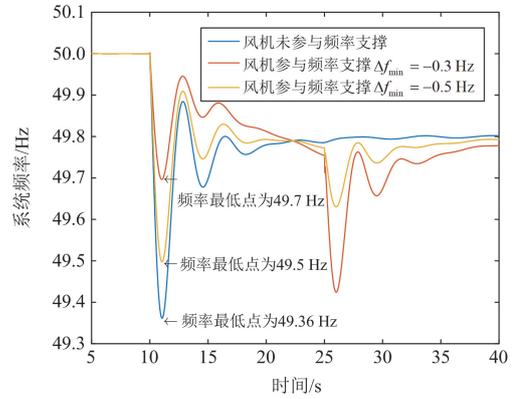


图 10 场景 1 系统频率响应对比

Fig. 10 Comparison of system frequency response in Scenario 1

风电机组捕获风能损失的仿真结果比较如表 3 所示，可以看出在 $\Delta f_{min} = -0.5$ Hz 的限制下，本文提出的频率支撑需求优化分配方法使得风能总损失

表 3 场景 1 风电机组风能损失对比

Table 3 Comparison of WTGs wind energy loss in Scenario 1

序号		E_{lossi} /MJ	$E_{loss\ all}$ /MJ
1	WF1	1.3830	3.7734
	WF2	1.2339	
	WF3	1.1565	
2	WF1	0.7068	3.8651
	WF2	1.1855	
	WF3	1.9728	
3	WF1	1.2173	3.7516
	WF2	1.2505	
	WF3	1.2839	
4	WF1	1.7371	5.3830
	WF2	1.7335	
	WF3	1.9124	

$E_{\text{loss all}}$ 最小。在 $\Delta f_{\text{min}} = -0.3 \text{ Hz}$ Δf_{min} 的限制下 $E_{\text{loss all}}$ 较大, 不利于风电场运行的经济性, 因此以下场景的仿真只考虑 $\Delta f_{\text{min}} = -0.5 \text{ Hz}$ 的限制。

场景 2: 假设负载 B 处发生突增 66.3% 的有功扰动, 9 m/s、10 m/s、11 m/s 这 3 个风速下的风电机组参与频率支撑。不同策略下风电机组频率支撑功率设定如表 4 所示。图 11 显示了系统频率响应对比图。在没有风电机组参与频率支撑的情况下, 系统频率最低点为 49.2 Hz。可以看出, 风电机组参与频率支撑将频率最低点限制在 49.5 Hz。在这种情况下, $\Delta P_{\text{sw all}}$ 为 0.5419 p.u., 但系统频率的二次跌落程度较为严重。

表 4 场景 2 风电机组频率支撑功率设定

Table 4 WTGs frequency support power setting in Scenario 2

频率最低点	序号	分配策略	$\Delta P_{\text{swi}}/\text{p.u.}$	$v_w/(\text{m/s})$	
$\Delta f_{\text{min}} = -0.5 \text{ Hz}$	1	平均分配	WF1	0.180 64	9
			WF2	0.180 64	10
			WF3	0.180 64	11
	2	加权分配	WF1	0.129 12	9
			WF2	0.177 09	10
			WF3	0.235 71	11
	3	优化分配	WF1	0.167 34	9
			WF2	0.178 45	10
			WF3	0.196 15	11

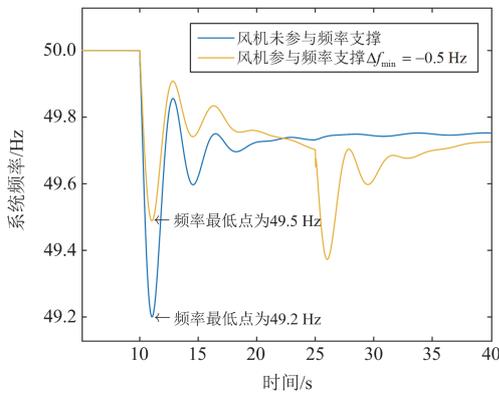


图 11 场景 2 系统频率响应对比

Fig. 11 Comparison of system frequency response in Scenario 2

风电机组捕获风能损失的仿真结果比较如表 5 所示, 可以看出本文提出的频率支撑需求优化分配方法使得 $E_{\text{loss all}}$ 最小。

场景 3: 假设负载 B 处发生突增 66.3% 的有功扰动, 9.25 m/s、10.25 m/s、11.25 m/s 这 3 个风速下的风电机组参与频率支撑。不同策略下风电机组频率支撑功率设定如表 6 所示。风电机组捕获风能损失的仿真结果比较如表 7 所示, 可以看出本文提

出的频率支撑需求优化分配方法使得 $E_{\text{loss all}}$ 最小。

表 5 场景 2 风电机组风能损失对比

Table 5 Comparison of WTGs wind energy loss in Scenario 2

序号		$E_{\text{lossi}}/\text{MJ}$	$E_{\text{loss all}}/\text{MJ}$
1	WF1	8.7679	
	WF2	7.5274	22.9963
	WF3	6.7010	
2	WF1	4.0781	
	WF2	7.1960	23.4933
	WF3	12.2192	
3	WF1	7.3271	
	WF2	7.3215	22.6913
	WF3	8.0427	

表 6 场景 3 风电机组频率支撑功率设定

Table 6 WTGs frequency support power setting in Scenario 3

频率最低点	序号	分配策略	$\Delta P_{\text{swi}}/\text{p.u.}$	$v_w/(\text{m/s})$	
$\Delta f_{\text{min}} = -0.5 \text{ Hz}$	1	平均分配	WF1	0.180 64	9.25
			WF2	0.180 64	10.25
			WF3	0.180 64	11.25
	2	加权分配	WF1	0.129 12	9.25
			WF2	0.177 09	10.25
			WF3	0.235 71	11.25
	3	优化分配	WF1	0.155 95	9.25
			WF2	0.184 10	10.25
			WF3	0.201 88	11.25

表 7 场景 3 风电机组风能损失对比

Table 7 Comparison of WTGs wind energy loss in Scenario 3

序号		$E_{\text{lossi}}/\text{MJ}$	$E_{\text{loss all}}/\text{MJ}$
1	WF1	8.3732	
	WF2	7.3150	22.2368
	WF3	6.5487	
2	WF1	3.9041	
	WF2	6.9957	22.7682
	WF3	11.8685	
3	WF1	5.9596	
	WF2	7.6335	21.9555
	WF3	8.3624	

3 个场景下风电机组风能总损失的仿真结果比较如图 12 和图 13 所示, 图 12 各项数值代表风能总损失的实际值, 图 13 各项数值代表不同场景下风能总损失的相对值。可以看出, 随着扰动的增大, 场景 1 和场景 2、3 对比风能损失陡然增大; 从每个场景下 3 种分配策略的对比可以看出, 本文所提风电机组频率支撑需求的优化分配方法使得风能损失总和最小。

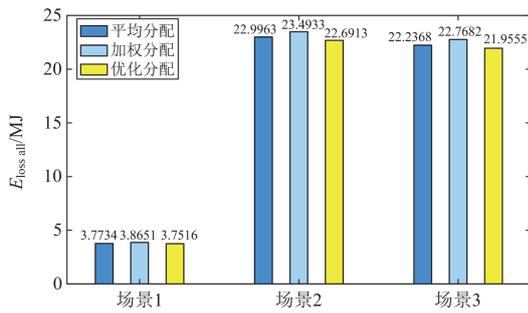


图 12 风电机组风能总损失对比(实际值)

Fig. 12 Comparison of total WTGs wind energy losses (real values)

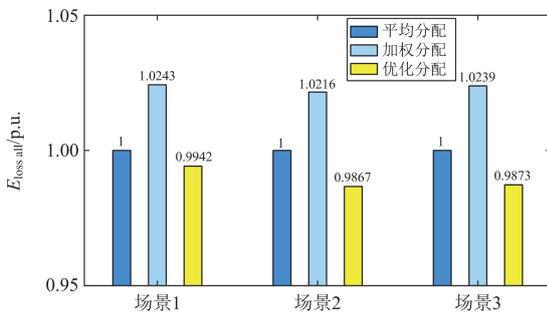


图 13 风电机组风能总损失对比(相对值)

Fig. 13 Comparison of total WTGs wind energy losses (relative values)

5 结论

本文以风电通过释放转子动能提供频率支撑为研究场景,提出了一种基于风电可用转子动能评估的频率支撑需求优化分配策略。首先基于其风电功率捕获特性解析推导了频率支撑期间的风能损失,得到了风电可用转子动能的精确表征方法。然后,结合电网实际运行场景,基于系统频率安全判据,提出了一种系统对风电频率支撑总体需求的评估方法。最后,以风能损失最小为目标,提出了频率支撑需求在不同运行状态的风电机组间的优化分配策略。仿真结果表明,本文所提方法能在保证系统频率安全的前提下,显著降低风电频率支撑期间的风能损失,统筹考虑了风电机组参与调频的经济性和安全性。本文的创新点如下:

1) 提出了一种风电可用转子动能和转子动能释放期间的风能损失表征方法,实现了对不同风速下运行的风电机组的频率支撑能力更加准确的评估。

2) 提出了一种扰动场景下,基于频率安全判据,系统对风电频率支撑总体需求的评估方法,能够实现风电对系统的调频能力作出合理的补充。

3) 类比火电机组的等耗量微增率准则,以总风能损失最小为目标,提出了一种优化分配策略,实现了频率支撑需求在不同运行状态下风电机组之间的具体分配。实现了从系统层面,同时考虑风电机组频率支撑能力、系统频率支撑需求双重波动的频率支撑需求合理分配。

随着高比例风电接入电力系统的频率问题日益凸显,本文研究可为大规模风电频率支撑方法的改进提供一定参考,提升对风电频率支撑能力的利用能效,保障电网安全运行。

参考文献

- [1] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [2] 李璐, 张泽端, 毕贵红, 等. “双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 69-81.
LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “dual carbon” targets[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 69-81.
- [3] 孙媛媛, 许庆燊, 马钊, 等. 数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 154-169.
SUN Yuanyuan, XU Qingshen, MA Zhao, et al. Key technologies for harmonic source tracing in new power system in background of digitalization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 154-169.
- [4] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [5] YANG Bo, XIE Rui, DUAN Jinhang, et al. State-of-the-art review of MPPT techniques for hybrid PV-TEG systems: modeling, methodologies, and perspectives[J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(4): 567-591.
- [6] 蒋佳良, 晁勤, 陈建伟, 等. 不同风电机组的频率响应特性仿真分析[J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 24-28.
JIANG Jialiang, CHAO Qin, CHEN Jianwei, et al. Simulation study on frequency response characteristic of different wind turbines[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(3): 24-28.
- [7] CONROY J F, WATSON R. Frequency response capability of full converter wind turbine generators in comparison to conventional generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 649-656.

- [8] HUGHES F M, ANAYA-LARA O, JENKINS N, et al. A power system stabilizer for DFIG-based wind generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(2): 763-772.
- [9] 朱介北, 王云逸, 仲悟之, 等. 基于超级电容的新能源惯量-阻尼-电抗综合模拟控制方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(19): 135-143.
ZHU Jiebei, WANG Yunyi, ZHONG Wuzhi, et al. Composite inertia-damping-impedance emulation control scheme for renewable energy sources based on supercapacitor[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(19): 135-143.
- [10] 李颖颖, 王德林, 范林源, 等. 双馈风电机组限功率运行下频率稳定的变系数控制策略[J]. *电网技术*, 2019, 43(8): 2910-2917.
LI Yingying, WANG Delin, FAN Linyuan, et al. Variable coefficient control strategy for frequency stability of DFIG under power-limited operation[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(8): 2910-2917.
- [11] HURTADO S, GOSTALES G, DE LARA A, et al. A new power stabilization control system based on making use of mechanical inertia of a variable-speed wind-turbine for stand-alone wind-diesel applications[C]// *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, November 5-8, 2002, Seville, Spain: 3326-3331.
- [12] 杨德健, 许益恩, 高洪超, 等. 计及转速平滑恢复的双馈风电机组自适应频率控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6): 172-179.
YANG Dejian, XU Yien, GAO Hongchao, et al. Self-adaptive frequency control scheme of a doubly-fed induction generator with smooth rotor speed recovery [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 172-179.
- [13] 陈哲, 王槽裕, 郭创新, 等. 计及风电备用容量与需求响应的多备用资源鲁棒优化[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 50-58.
CHEN Zhe, WANG Luyu, GUO Chuangxin, et al. Robust optimization of multiple reserve resources considering reserve capacity of wind power and demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(10): 50-58.
- [14] 马明日, 聂海龙, 张凡, 等. 基于转子动能释放的风电场一次调频能力评估模型研究[J]. *科技与创新*, 2024(17): 100-103.
- [15] 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.
- [16] 孙龙. 能量视角下的风电机组调频能力评估研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
SUN Long. Evaluation of frequency regulation capability of wind turbine from the perspective of energy[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [17] 何廷一, 孙领, 王晨光, 等. 避免频率二次跌落的风电场一次调频功率分配方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(11): 12-20.
HE Tingyi, SUN Ling, WANG Chenguang, et al. A method of primary frequency regulation power distribution in a wind farm to avoid secondary frequency drop[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(11): 12-20.
- [18] 王瑞明, 徐浩, 秦世耀, 等. 风电场一次调频分层协调控制研究与应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(14): 50-58.
WANG Ruiming, XU Hao, QIN Shiyao, et al. Research and application on primary frequency regulation of wind farms based on hierarchical coordinated control[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(14): 50-58.
- [19] 李想, 刘克天, 李军, 等. 基于风电机组转子动能的风电场一次调频功率分配优化[J]. *动力工程学报*, 2023, 43(9): 1238-1246.
LI Xiang, LIU Ketian, LI Jun, et al. Optimization of power distribution for primary frequency regulation of wind farm based on rotor kinetic energy of wind turbines[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(9): 1238-1246.
- [20] 鲍威宇. 风电惯量参与电网调频的控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
BAO Weiyu. Studies on participation of wind power inertia in power system frequency control[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [21] 李东东, 张先明, 姚寅, 等. 计及转子动能损失和风速相关性的风电场有效惯量估计[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 63-73.
LI Dongdong, ZHANG Xianming, YAO Yin, et al. Estimation of effective inertia of a wind farm considering rotor kinetic energy loss and wind velocity correlation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 63-73.
- [22] GULZAR M M. Designing of robust frequency stabilization using optimized MPC-(1+PIDN) controller for high order interconnected renewable energy based power systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(1): 1-14.
- [23] HOU Anxiang, SUN Long, BAO Weiyu, et al. Frequency support capability evaluation of wind turbine generators considering captured wind energy loss[C]// *2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE)*, April 27-30, 2023, Chengdu, China: 324-329.
- [24] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1990, 5(3): 720-729.
- [25] GUO Jiahui, ZHANG Ye, MARCUS A, et al. Design and implementation of a real-time off-grid operation detection tool from a wide-area measurements perspective[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(4): 2080-2087.

收稿日期: 2024-08-30; 修回日期: 2024-11-20

作者简介:

朱元振(1994—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: zhuyuanzhen924@163.com

(编辑 周金梅)