

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240623

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

钱敏慧^{1,2}, 张建胜¹, 秦文萍¹, 杨德健³, 王鑫³

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 可再生能源并网全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192; 3. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对含双馈风机调频的系统频率响应模型不明确和转子有效旋转动能利用不充分的问题, 提出一种基于双馈风电机组有效旋转动能的频率支撑策略。首先, 基于传统系统频率响应模型建立了含双馈风机调频的系统频率响应模型, 并推导计及风电渗透率下系统频率偏差域表达式, 在不同阻尼比下分析双馈风机调频对系统频率响应特性的影响。其次, 深入分析现有的计及双馈风机转子转速的频率支撑策略的优缺点。结合我国风电机组调频控制参数的规程要求, 设计一种基于双馈风机有效旋转动能的自适应频率支撑策略。最后, 基于 IEEE 14 节点电力系统模型, 验证了所提策略在不同扰动、风速及风电渗透率条件下风机转子动能充分释放参与调频的优越性能。

关键词: 双馈风电机组; 自适应频率支撑策略; 频率响应模型; 下垂控制

System frequency response characteristic considering DFIG frequency regulation and fast frequency response strategy

QIAN Minhui^{1,2}, ZHANG Jiansheng¹, QIN Wenping¹, YANG Dejian³, WANG Xin³

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. National Key Laboratory of Renewable Energy Grid-integration (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 3. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: To address the issues of an unclear system frequency response model with a doubly-fed induction generator (DFIG) and insufficient utilization of rotor effective rotational kinetic energy, this paper proposes a frequency support strategy based on the effective rotational kinetic energy of the DFIG. Firstly, a system frequency response model including DFIG frequency regulation is established based on the traditional system frequency response model, and an expression for system frequency deviation considering wind power penetration is derived. The impact of DFIG frequency regulation on system frequency response characteristics with different damping ratios is analyzed. Secondly, the advantages and disadvantages of existing frequency support strategies considering DFIG rotor speed are deeply analyzed. Combining the regulatory requirements for frequency regulation control parameters of wind turbines in China, an adaptive frequency support strategy based on the effective rotational kinetic energy of the DFIG is designed. Finally, based on the IEEE 14-bus power system model, the superior performance of the proposed strategy in fully releasing rotor kinetic energy for frequency regulation under different disturbances, wind speeds, and wind power penetration conditions is verified.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2400500).

Key words: DFIG; adaptive frequency support strategy; frequency response model; droop control

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2400500)

0 引言

随着我国“双碳”目标的持续推进,以风电为主的新能源高比例并网成为我国新型电力系统的主要特征。基于电力电子接口的风力发电设备代替传统同步机大规模并网,难以主动响应系统频率变化,对外呈现近零惯性,导致系统惯量降低^[1-3]。系统受扰后,容易诱发电力系统低频减载、高频切机等保护动作,导致电网大面积停电,严重时导致电网失稳;此外,风电机组耐频率异常能力差,极端情况下易诱发大面积脱网,引发连锁事故^[4-6]。

2016年南澳“9·28”大停电、2019年英国“8·9”停电事故^[7-8]等均暴露出高比例新能源电力系统因惯量不足引发的系统频率安全稳定问题,并引发国内外研究机构、学者对低惯量电力系统频率稳定性问题的高度关注。

考虑电力电子设备的高灵活性及强可控性,众多学者提出双馈风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)的虚拟惯量响应策略^[9-11],即利用DFIG转子中储存的转子动能,模拟同步机的惯量响应特性。国内外的电网导则中均要求联网风电场应具备一定的支撑能力^[12-13],如加拿大魁北克电网规定装机容量大于10 MW的风电场必须具备频率支撑功能,高频与低频阶段分别由一次调频与惯量控制实现。

目前,基于DFIG的虚拟惯量策略主要分为改善功率扰动后电网频率最低点的下垂控制与系统频率最大变化率的虚拟惯性控制^[14-15]。文献[16]考虑传统风电机组虚拟惯性控制固定系数的不足,提出了一种风电机组自适应虚拟惯性控制,能加快频率恢复;文献[17]在传统虚拟惯性控制中添加转速优化模块,使风机转子平缓地释放或吸收更多动能,改善风电机组的惯性响应,但虚拟惯性对频率微分量敏感,极易给系统引入噪声干扰。文献[18]将下垂控制与减载控制解耦,通过粒子群算法优化下垂系数,有效提高了电网频率稳定性。由于DFIG可利用的“旋转动能”有限,一味地追求频率响应,势必会增加转速到达限幅的风险,影响DFIG安全稳定运行^[19];为此,文献[20-21]提出了基于风机转子转速的下垂控制增益,但其关键参数整定较为困难,难以应用到工程实际中。

系统频率响应(system frequency response, SFR)模型作为描述干扰后系统频率变化模型,已应用于各种动态研究。文献[22]基于多级SFR模型评估了低频负载脱网对系统频率响应的影响。为消除多机

影响,文献[23]提出了一种将多机SFR模型聚合为单机模型的解析方法,所提出的聚合SFR模型能够准确代表多机SFR模型。文献[23]利用SFR模型表示大型系统的频率响应,进行了系统频率稳定性分析。但风机参与调频后势必会对原有SFR模型产生影响,亟需建立计及风机调频的SFR模型,推导含风机调频的频率偏差解析式,为设计风机调频策略提供模型基础。

为明确现有DFIG调频响应特性,考虑风电渗透率等多种因素对系统频率时域模型的影响,本文搭建了计及风机调频的系统频率响应模型,分析了系统频率偏差时域特性,推导不同情况下的系统频率时域表达式。为更充分发挥风机的调频潜力,解决风机调频参数整定难的问题,本文通过分析现有考虑DFIG转子转速的频率支撑策略的不足,考虑DFIG调频前有效旋转动能,设计了一种基于DFIG有效旋转动能的自适应频率支撑策略。最后,基于IEEE 14节点电力系统验证所提策略的有效性。

1 计及 DFIG 调频的系统频率响应特性

1.1 简化系统频率响应模型

假设系统电源仅包含同步电机与以风机为代表的新能源场站,由于DFIG对系统呈现近零惯量特性,系统惯量仅由同步机提供,则系统惯性常数 H 可表示为

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n H_{\text{syn},i} S_{\text{syn},i}}{\sum_{i=1}^n S_{\text{syn},i} + \sum_{j=1}^m S_{\text{DFIG},j}} \quad (1)$$

式中: $H_{\text{syn},i}$ 为同步发电机组 i 的惯性常数; $S_{\text{syn},i}$ 为同步发电机组 i 的额定容量; $S_{\text{DFIG},j}$ 为双馈风力发电机 j 的额定容量; n 为同步发电机组的台数; m 为风电机组的台数。考虑同步风机组参与系统调频,当系统频率偏差为 Δf 时,系统一次调频总出力 ΔP_{Σ} 为

$$\Delta P_{\Sigma} = -\frac{\Delta f}{f_{\text{nom}}} \sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{syn},i}^N}{R_{\text{syn},i}^*} \quad (2)$$

式中: f_{nom} 为系统频率基准值; $R_{\text{syn},i}^*$ 为同步发电机组 i 调差系数标幺值; $P_{\text{syn},i}^N$ 为同步发电机组 i 的额定功率。

系统一次调频总出力如式(3)所示。

$$\Delta P_{\Sigma} = -\frac{\Delta f}{f_{\text{nom}}} \frac{P_{\text{eq}}^N}{R} \quad (3)$$

式中: P_{eq}^N 为系统总功率; R 为等效调差系数。

联立式(2)和式(3)可得, 等效调差系数为

$$R = \frac{P_{eq}^N}{\sum_{i=1}^n \frac{P_{syn,i}^N}{R_{syn,i}^*}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{syn,i}^N + \sum_{j=1}^m P_{DFIG,j}^N}{\sum_{i=1}^n \frac{P_{syn,i}^N}{R_{syn,i}^*}} \quad (4)$$

式中, $P_{DFIG,j}^N$ 为系统中双馈风力发电机 j 的额定功率。

为简化分析, 电力系统频率响应模型可由图 1 所示的经典单机等值模型等效表示, 模型中包含同步机组调速器、涡轮机、发电机及负荷等。图 1 中: T_R 为再热器惯性时间常数; P_{SP} 为同步机参考功率; F_H 为涡轮机特征系数; H 为系统惯性常数, 与 R 均考虑了风电渗透率的影响, 采用式(1)和式(4)计算; K_m 为同步发电机组的调频备用容量系数; P_L 为负荷功率; P_m 为同步机组的输出功率。

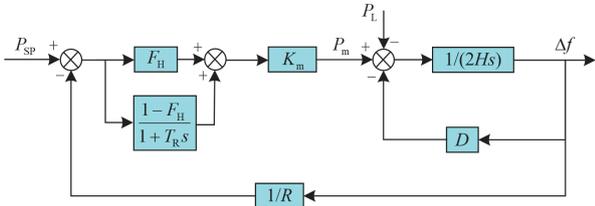


图 1 电力系统频率响应模型

Fig. 1 Frequency response model of power system

DFIG 通过灵活、快速可控的电力电子装置代替传统同步发电机并网, 随风电渗透率的增加, 系统惯量降低。由于 DFIG 不同于同步机的调频特性, 导致传统电力系统频率响应模型发生变化。因此考虑风电渗透率的影响, 同时为避免频率变化率的噪声干扰, 在图 1 中引入 DFIG 下垂控制, 建立如图 2 所示的计及 DFIG 的电力系统频率响应模型, 其中: T_{DFIG} 为 DFIG 延迟环节的时间常数; α 为渗透率。

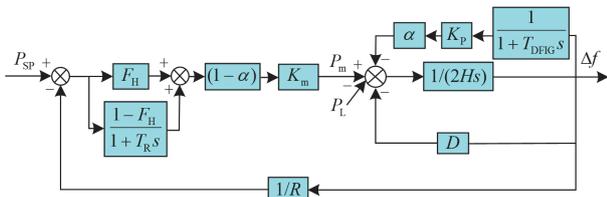


图 2 计及 DFIG 的电力系统频率响应模型

Fig. 2 Power system frequency response model with DFIG

在图 2 中, DFIG 采用电力电子器件实现调频控制, 反应迅速, 与系统的惯性时间常数、再热时间常数相比时间尺度很小。因此, 可将 $1/(1 + T_{DFIG})$ 环节近似为幅值为 1 的静态环节^[24-25]。

结合图 2, 可推导出计及 DFIG 的系统频率偏差频域表达式为

$$\Delta f = \frac{1}{2HT_R} \left[\frac{K_m(1 + F_H T_R s)P_{SP} - (1 + T_R s)P_L}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right] \quad (5)$$

其中, 中间变量 ω_n 、 ζ 的表达式为

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{DR + K_m + \alpha K_p R}{2HRT_R} \\ \zeta = \frac{1}{2\omega_n} \left(\frac{1}{T_R} + \frac{D + \alpha K_p}{2H} + \frac{K_m F_H}{2HR} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_p 为调频控制系数; D 为阻尼系数。

由式(5)可以得出, Δf 对 P_{SP} 或 P_L 变化的响应具有相同的形式, 但符号并不相同。因此针对以突变负荷扰动 ΔP_L 为特征的问题 ($P_{SP} = 0$), 可进一步将系统简化为图 3 所示的模型。图 3 中, 定义了一个扰动功率 ΔP_L 作为新的系统输入变量。功率扰动-频率变化闭环传递函数 G_{SYS} 为

$$G_{SYS} = \frac{\Delta f}{\Delta P_L} = \frac{1}{2HT_R} \frac{1 + T_R s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

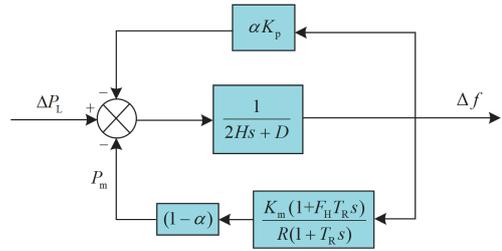


图 3 简化后计及 DFIG 的电力系统频率响应模型

Fig. 3 Simplified power system frequency response model with DFIG

1.2 计及 DFIG 调频的电力系统频率时域响应特性分析

当负荷突然增加时, 扰动频域表达式为

$$\Delta P_L(s) = \frac{-\Delta P_L}{s} \quad (8)$$

将式(8)代入到式(7)可知, 系统频率偏差的频域表达式为

$$\Delta f(s) = \frac{-\Delta P_L}{2HT_R} \frac{1 + T_R s}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (9)$$

为明确系统频率时域模型, 考虑不同阻尼比 ζ 在不同区间的影响, 将 ω_n 代入式(9)可得

$$\zeta = \frac{\frac{1}{T_R} + \frac{D + \alpha K_p}{2H} + \frac{K_m F_H}{2HR}}{2\sqrt{\frac{D}{2HT_R} + \frac{K_m}{2HRT_R} + \frac{\alpha K_p}{2HT_R}}} \quad (10)$$

随风机渗透率的增加以及风机调频控制参数的影响, K_p 、 H 、 α 均会发生变化, 进而导致阻尼

比 ζ 处于不同分区, 故根据式(10)做出 ζ 的三维图像, 如图 4 所示。

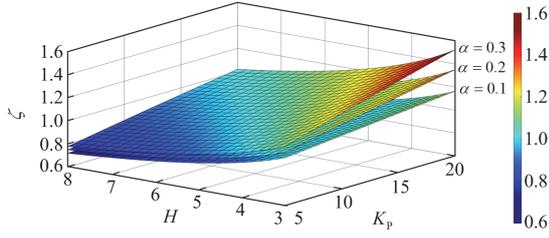


图 4 ζ 三维图像

Fig. 4 Three-dimensional image of ζ

1) 当 $\zeta = 0$ 时

将 $\zeta = 0$ 代入式(9), 系统频率偏差的频域表达式变为

$$\Delta f(s) = \frac{-\Delta P_L}{2HT_R} \frac{1+T_R s}{s(s^2 + \omega_n^2)} \quad (11)$$

据式(11)可知, 系统处于无阻尼状态, 存在一对共轭虚根, 造成系统阶跃响应下等幅周期振荡, 系统不稳定。

2) 当 $0 < \zeta < 1$ 时

系统处于欠阻尼状态, 存在一对共轭复根在复平面左半平面, 系统经衰减振荡后趋于稳定。依据拉普拉斯逆变换公式, 可求得系统频率偏差的时域响应表达式为

$$\Delta f(t) = \frac{-\Delta P_L}{D + \alpha K_p + \frac{K_m}{R}} [1 + A e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi)] \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} A = \sqrt{(T_R^2 \omega_n^2 - 2\zeta T_R \omega_n + 1)/(1 - \zeta^2)} \\ \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \\ \phi = \phi_1 - \phi_2 = \arctan\left(\frac{\omega_d T_R}{1 - \zeta \omega_n T_R}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{-\zeta}\right) \end{cases} \quad (13)$$

式中, A 、 ω_d 、 ϕ 、 ϕ_1 、 ϕ_2 均为拉普拉斯逆变换推导过程引入的中间变量。

令式(12)中 $\Delta f(t)$ 的一阶导数为 0, 计算动态过程峰值时间 t_p 为

$$t_p = \frac{n\pi - \phi_1}{\omega_d} = \left[n\pi - \arctan\left(\frac{\omega_d T_R}{1 - \zeta \omega_n T_R}\right) \right] / \omega_d \quad (14)$$

式中, $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

系统频率最大偏差 Δf_{\max} 可表示为

$$\Delta f_{\max} = \frac{\Delta P_L}{D + \alpha K_p + \frac{K_m}{R}} \cdot [1 + A e^{-\zeta \omega_n t_p} \sin(\omega_d t_p + \phi)] \quad (15)$$

3) 当 $\zeta = 1$ 时

系统频率频域模型有一对负实部的重根, 系统经单调上升后趋于稳定, 此时系统频率偏差的时域响应表达式为

$$\Delta f(t) = \frac{-\Delta P_L}{D + \alpha K_p + \frac{K_m}{R}} [1 + (\omega_n^2 T_R - \omega_n) t e^{-\omega_n t} - e^{-\omega_n t}] \quad (16)$$

同理, 令式(16)中 $\Delta f(t)$ 的一阶导数为 0, 计算动态过程峰值时间 t_p 为

$$t_p = \frac{T_R}{\omega_n T_R - 1} \quad (17)$$

将 t_p 代入式(16)可得系统频率最大偏差。

4) 当 $\zeta > 1$ 时

系统频率频域模型有两个互异负实根, 系统经单调上升后趋于稳定, 此时系统频率偏差表达式为

$$\Delta f(t) = \frac{-\Delta P_L T_R}{D + \alpha K_p + \frac{K_m}{R}} \left[a_0 - \frac{b(a_0 - a)}{b - a} e^{-at} + \frac{a(a_0 - b)}{b - a} e^{-bt} \right] \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} a_0 = 1/T_R \\ a = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n \\ b = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n \end{cases} \quad (19)$$

系统频率最大偏差为

$$\Delta f_{\max} = \frac{-\Delta P_L T_R}{D + \alpha K_p + \frac{K_m}{R}} \left[a_0 + \frac{(a - a_0)^{b/(b-a)}}{(b - a_0)^{a/(b-a)}} \right] \quad (20)$$

结合图 4 可知, 随着越来越多的风电机组代替同步机组并入电网, H 将逐步降低, 为保障系统频率稳定, DFIG 需要在规程允许范围内尽可能增大调频控制系数 K_p , 改善频率波动, 进一步增加 ζ 值。通过这一正反馈过程使阻尼比 ζ 不断向大于 1 的方向偏移, 增加了 ζ 大于 1 的概率, 因此扰动后的系统频率响应模型多采用式(18)和式(20)模型。

假定在系统惯量 H 为 4.0 s、风电渗透率为 25% 的电力系统中, 发生 10% 的功率缺额, 由上述系统频率表达式可知, 在不同 K_p 下系统频率跌落最低点以及不同 ζ 分区下 Δf_{\max} 的变化情况, 如图 5 所示。

结合图 5 可知, 当 $\zeta > 0$ 时, 在 DFIG 调频能力充足的情况下, 总能维持系统频率稳定, 且随着调频控制系数 K_p 的增加, 系统频率最大偏差逐渐减小, DFIG 的调频效果也更为显著。因此, DFIG 参

与系统调频有利于维持系统的频率稳定,同时,采用合理的频率支撑策略及恰当的控制参数至关重要。此外,随着风电渗透率的增加,采用式(18)和式(20)的模型分析系统频率动态响应特性。

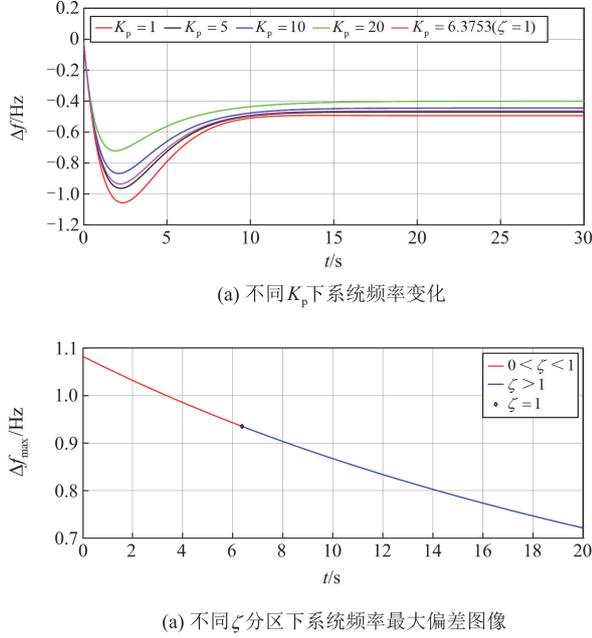


图5 系统频率变化及频率最大偏差

Fig. 5 System frequency change and frequency maximum deviation

2 计及 DFIG 有效旋转动能的频率支撑策略

由于传动系统将齿轮箱与 DFIG 发电机连接起来,转子转速可以直观地体现 DFIG 在不同运行工况下的运行状态,因此,建立 ω_r 与 K_p 的耦合关系,势必能增加 DFIG 频率支撑能力。

DFIG 可释放或吸收的有效旋转动能 ΔE_{DFIG}^* 如式(21)^[22]所示。

$$\Delta E_{\text{DFIG}}^* = \begin{cases} H_{\text{DFIG}}(\omega_r^2 - \omega_{\min}^2) & \omega_r > \omega_{\min} \\ H_{\text{DFIG}}(\omega_{\max}^2 - \omega_r^2) & \omega_r < \omega_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: H_{DFIG} 为 DFIG 的惯性常数,其值等于风力机和感应发电机的惯性常数之和; ω_r 为 DFIG 转子转速的标么值; ω_{\min} 、 ω_{\max} 分别为 DFIG 转子转速最小、最大限值的标么值。

仿照式(21)的形式,定义下垂控制回路的调频控制系数 K_p 与 ΔE_{DFIG}^* 成正比例关系^[21],可以表示为

$$\begin{cases} K_p \propto \Delta E_{\text{DFIG}}^* \\ K_p = k \frac{\omega_r^2 - \omega_{\min}^2}{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2} \end{cases} \quad (22)$$

式中, k 为 DFIG 频率支撑阶段调频系数。

依据式(22)可以得出调频控制系数 K_p 随风机转子转速的变化示意图,如图6所示。在扰动初始阶段,DFIG 转速较大时,调频控制系数 K_p 较大,有利于 DFIG 输出较多的旋转动能,维持系统的频率稳定,有效提高了各种工况下风力机组的频率支撑能力。而随着 DFIG 转子动能的释放,转子转速下降, K_p 由右到左逐渐下降,DFIG 的调频输出功率减小。

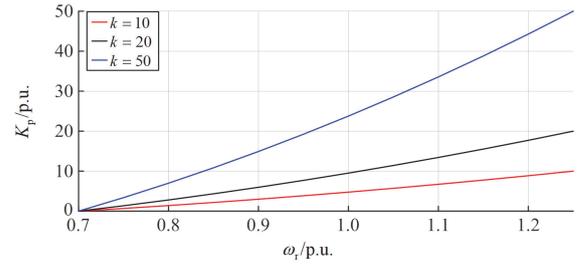


图6 K_p 随 ω_r 变化的曲线

Fig. 6 Curve of K_p vs. ω_r

结合式(22)与图6分析可知,基于转子转速的 DFIG 下垂控制仍存在以下不足。

1) 建立 K_p 与 ω_r 的耦合关系有效保障了 DFIG 调频运行时自身的安全稳定,避免了风机失速现象的发生,但 K_p 与控制系数 k 成正比,由图6可以看出, K_p 对 k 的变化反应灵敏。不同 k 值将影响 DFIG 调频输出功率,如何设计系数 k 需进一步研究。

2) 扰动初期,系统功率缺额最大,需要更大的调频功率,根据式(22)可知,DFIG 按照原有值 k 进行调频,面向急缺调频功率场景,DFIG 的旋转动能未被充分利用,因此如何更有效地利用 DFIG 旋转动能仍有待改进。

3 基于 DFIG 有效旋转动能的自适应频率支撑策略

为提高新能源高占比系统的频率稳定性,众多国家颁布了相关规定,明确风电场调频能力。以英国、丹麦为代表的的新能源高占比国家要求的风机调差率均在2%~10%,我国在2021年颁布的《并网电源一次调频技术规定及试验导则》中提出风电场应具备2%~10%的调差率^[26]。本文依照各国家电网运行标准,设风机调频最大调差率为 $R_{\text{DFIG}_{\max}} = 10\%$ 、最小调差率为 $R_{\text{DFIG}_{\min}} = 2\%$,则对应的最大调频控制系数为 $K_{p_{\max}} = 1/R_{\text{DFIG}_{\min}} = 50$ 、最小调频控制系数为 $K_{p_{\min}} = 1/R_{\text{DFIG}_{\max}} = 10$ 。

为充分利用风机的调频潜力, 本文提出了基于 DFIG 有效旋转动能的自适应频率支撑策略, 其在频率支持阶段的 DFIG 输出参考功率及控制参数如式(23)所示, 其控制框图如图 7 所示。

$$\begin{cases} \Delta P_w = -K_p \Delta f \\ K_p = K_{p_min} + (K_{p_max} - K_{p_min}) \frac{\omega_r^2 - \omega_{min}^2}{\omega_0^2 - \omega_{min}^2} \end{cases} \quad (23)$$

式中: ΔP_w 为 DFIG 的调频出力; ω_0 为 DFIG 的转子额定转速。

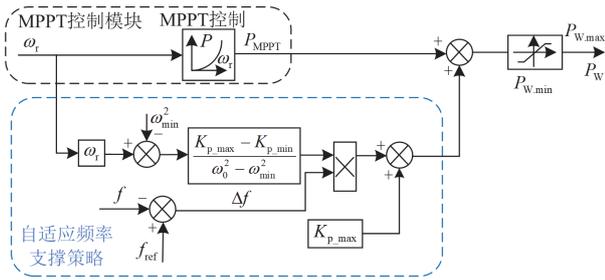


图 7 基于 DFIG 有效旋转动能的频率支撑策略

Fig. 7 Frequency support strategy based on DFIG effective rotational kinetic energy

由式(23)可以看出, 在扰动初期, 以 K_{p_max} 进行频率支撑, 改善系统频率跌落; 随着转子动能的释放, ω_r 逐渐减小, K_p 在 $K_{p_min} \sim K_{p_max}$ 范围内进行调频, 保障风机稳定运行。

图 8 给出 K_p 与 ω_r 、 ω_0 关系的三维曲面图。在扰动初期, DFIG 按照相关准则以 K_{p_max} 进行调频, 充分利用转子动能抑制频率跌落, 随着调频程度的加深, K_p 减小有利于 DFIG 自身稳定运行, 同时更有利于发挥 DFIG 自身的调频潜力, 维护系统频率安全稳定。

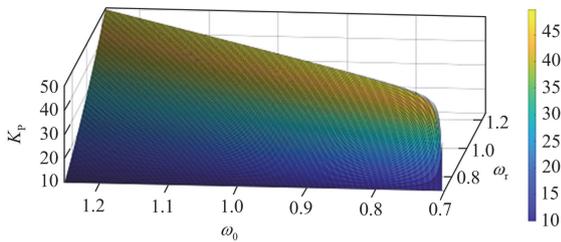


图 8 K_p 与 ω_r 、 ω_0 的变化曲线

Fig. 8 Curve of K_p vs. ω_r and ω_0

4 算例分析

本文基于 EMTP-RV 仿真平台搭建了含 DFIG 聚合风电场的 IEEE 14 节点系统, 对所提基于 DFIG 有效旋转动能的自适应频率支撑策略进行有效性验

证。仿真系统结构如图 9 所示, 包含 5 台同步发电机, 分别为 SG_1 、 SG_2 、 SG_3 、 SG_4 、 SG_5 , 静态负荷的总额定功率为 644 MW, 两风电场为多台 DFIG 等效聚合风电场。

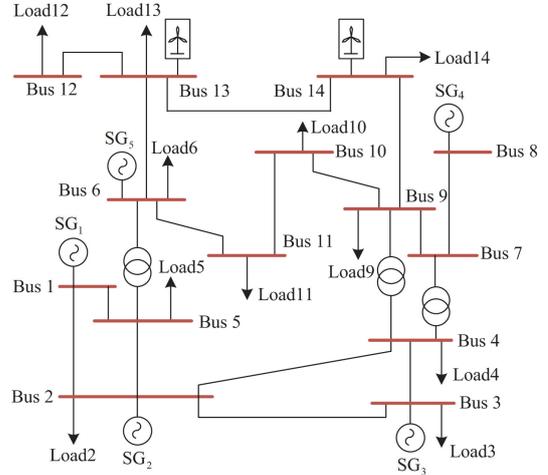


图 9 IEEE 14 节点系统模型

Fig. 9 System model of IEEE 14 bus

在恒定风速下, 分别对 MPPT、基于 DFIG 转子转速的频率支撑策略^[18](记作方法 I, 设 $K_p = 20$) 及本文频率支撑策略(记作方法 II)的调频结果进行分析, 具体算例设置如表 1 所示。风电渗透水平根据风电场的装机容量计算, 如式(24)^[18]所示。

$$\text{风电渗透率} = \frac{P_{W, \text{installed}}}{P_{L, \text{max}}} \times 100\% \quad (24)$$

式中: $P_{W, \text{installed}}$ 为聚合风电场风机装机容量; $P_{L, \text{max}}$ 为最大负荷。

表 1 算例设置

Table 1 Case settings

算例	风速/(m/s)	风电渗透率/%	扰动事件
1	8	24	SG_2 有功损失 60 MW
2	8	24	SG_2 有功损失 100 MW
3	10	24	SG_2 有功损失 100 MW
4	10	35	SG_2 有功损失 100 MW

4.1 不同扰动的仿真分析

算例 1: 风速为 8 m/s, 风电渗透率为 24%, SG_2 有功损失为 60 MW。

图 10 给出了算例 1 下的频率、DFIG 有功、转速和频率控制系数仿真结果。当 DFIG 不参与系统频率支撑时, DFIG 为 MPPT 运行, 风机安全稳定运行, 在 60 MW 功率扰动下, 频率跌落至 59.43 Hz, 系统频率安全受到严重威胁。而当 DFIG 采用方法 I 参与系统频率支撑时, DFIG 有功出力增加至 65.71 MW, 补偿了系统的有功缺额, 将电网频率最

低点增加到 59.58 Hz，与此同时 DFIG 转子转速下降到 0.84 p.u.，存在一定的可用裕度。当 DFIG 采用方法 II 时，DFIG 转子动能利用更充分，频率仅跌落到 59.68 Hz，DFIG 最大出力达到 77.02 MW，这是因为在扰动初期， K_p 按照式(23)预设，扰动初期以 K_{p_max} 运行使 DFIG 输出更多的转子动能，同时随着转子动能的释放， K_p 逐渐减小以缓解风机失速现象。

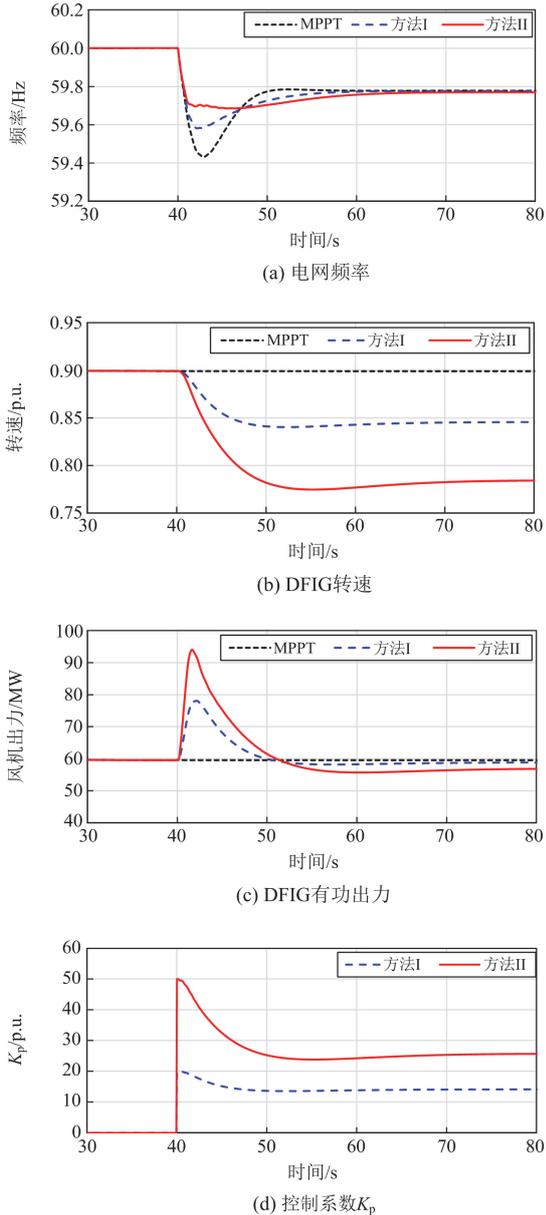


图 10 算例 1 结果

Fig. 10 Results of Case 1

算例 2: 风速为 8 m/s, 风电渗透率为 24%, SG_2 有功损失为 100 MW。

图 11 给出了算例 2 的仿真结果。相比算例 1，大功率脱机造成的不平衡功率增大，导致系统需要更多的调频功率，以维护电网频率安全稳定。算例 2 中，DFIG 仅 MPPT 运行时，电网频率最低点跌落到 59.05 Hz，系统频率跌落更加严重。

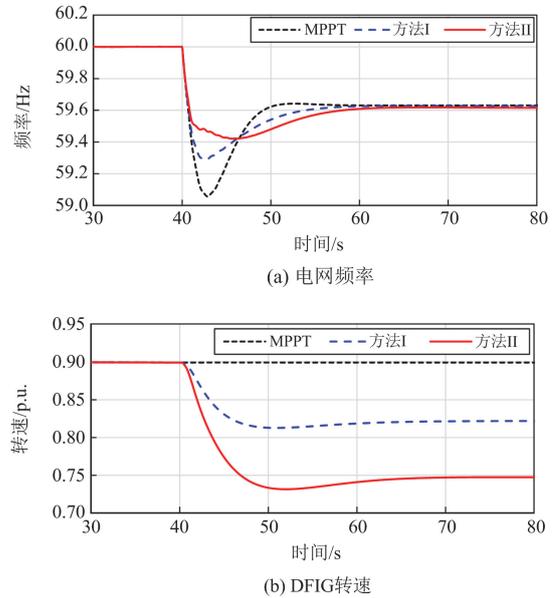


图 11 算例 2 结果

Fig. 11 Results of Case 2

当 DFIG 采用方法I时，电网频率跌落到 59.27 Hz；而当采用方法II时，DFIG 能大幅增加调频输出，将频率最低点升至 59.43 Hz，与方法I相比，对频率改善效果更好。这主要因为在 DFIG 频率支撑策略中受到 Δf 耦合项的影响， Δf 随系统不平衡功率增加而增加，故 DFIG 的调频输出增加。算例 2 中 DFIG 采用方法 I、II 时的最大出力分别为 88.60 MW、113.71 MW，有效地缓解系统频率跌落。方法 II 中，由于 K_p 在扰动初期获得更大的调频增益整定值，使 DFIG 调频潜力利用更充分，即转子的旋转动能释放更多，频率支撑效果更好。

4.2 不同风速的仿真分析

随着风速变化，风机运行状态发生显著变化，风机储存的有效旋转动能也发生改变，为验证不同风速下方法 II 的有效性，分别考虑风速为 10 m/s、功率缺额扰动为 100 MW 两种场景，对比算例 2，研究所提方法 II 的 DFIG 调频性能。

算例 3: 风速为 10 m/s, 风电渗透率为 24%, SG_2 有功损失为 100 MW。

图 12 展示了算例 3 的仿真结果。受风速增大的影响，扰动前 DFIG 有功出力提升至 118.4 MW，转子转速恒定为 1.13 p.u.。当 DFIG 采用 MPPT 策略

时, 频率最低点为 59.05 Hz。与 MPPT 策略相比, 当 DFIG 采用方法 I、II 时, 频率最低点分别提高了 0.24 Hz、0.30 Hz, 相比算例 2 分别提升 0.22 Hz、0.27 Hz。因为, 在高风速情况下, 风机旋转部件中蕴含的可调用能量更加可观, 因此, 高风速下方法 I 和方法 II 的调频效果优于算例 2。

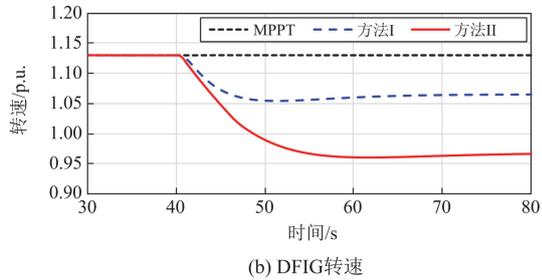
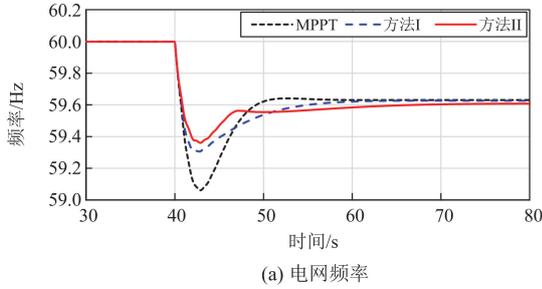


图 12 算例 3 结果

Fig. 12 Results of Case 3

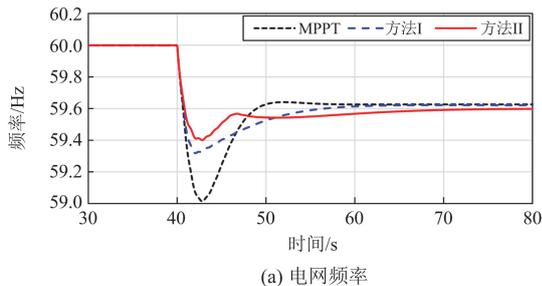
由算例 2 和算例 3 分析可知, 随着风速的升高, DFIG 储存的有效旋转动能增加, DFIG 采用方法 II 参与系统调频可充分发挥 DFIG 的调频潜力, 进一步提高系统频率最低点。

4.3 不同风电渗透率的仿真分析

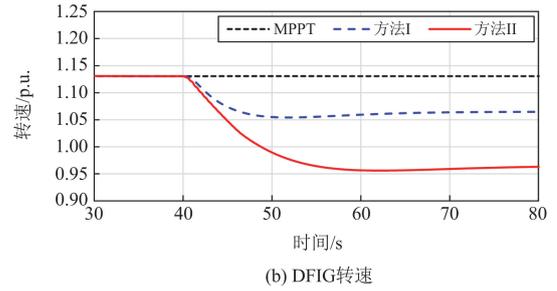
将模型中每个风电场的 DFIG 台数由 16 台增加到 22 台, 同时切除 SG_5 , 在保证系统总出力不变的情况下, 风电渗透率提升至 35%。

算例 4: 风速为 10 m/s, 风电渗透率为 35%, SG_2 有功损失为 100 MW。

算例 4 的仿真结果如图 13 所示, 受系统惯量下降的影响, DFIG 未参与调频时, 系统频率最低点跌落至 59.01 Hz, 为所有算例最低, 而当 DFIG 采



(a) 电网频率



(b) DFIG 转速

图 13 算例 4 结果

Fig. 13 Results of Case 4

用方法 I、II 进行频率支撑时, DFIG 的转子动能得到释放, 频率最低点分别提升至 59.31 Hz、59.40 Hz, 而方法 II 中转子动能利用更充分, 频率改善效果更好。

结合算例 3 和算例 4 可知, 在不同风电渗透率场景下, DFIG 采用方法 II 时保证了转子动能的充分利用, 在避免风机失速的情况下, 显著提升频率最低点, 维护系统频率稳定。

5 结论

为明确计及 DFIG 调频的系统频率响应特性, 充分挖掘风机的调频潜力, 解决风机调频参数设置的问题, 本文开展系统频率时域特性分析, 提出了一种基于 DFIG 有效旋转动能的频率支撑策略, 主要创新点如下:

1) 构建包含 DFIG 调频的系统频率响应模型, 对计及 DFIG 调频的电力系统频率时域响应特性展开分析, 推导并证明系统的频域表达式中阻尼比受风电渗透率以及调频控制参数的影响。根据不同阻尼比, 系统频率时域表达式分为 3 种情况。本文采用阻尼比大于 1 的分析模型分析系统频率动态响应特性。

2) 为更充分地发挥风机调频潜力, 建立风机转速与 K_p 的耦合关系, 使风机在调频初期, 充分利用转子的有效旋转动能, 抑制电网频率跌落, 随着调频程度的加深, K_p 减小则有利于 DFIG 稳定运行。

鉴于储能装置跟踪精确、快速响应和双向调节等优点, 未来将会逐步形成风电场-储能联合运行模式, 后期为解决风机恢复转子转速引发的二次频率跌落问题及提升系统频率支撑能力, 将进一步开展风储协同控制策略研究。

参考文献

- [1] 王雪, 刘林, 刘文迪, 等. 基于纵横交叉算法的新型电力系统惯量延迟优化控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 12-20.

- WANG Xue, LIU Lin, LIU Wendi, et al. A novel inertia delay optimization control strategy for new power systems based on crisscross optimization[J]. *Electric Power*, 2024, 57(7): 12-20.
- [2] 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.
- [3] 陈平, 杜文娟. 基于新能源下混合风电场不同类型风机动态特性相似环节引起的振荡风险研究[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(12): 114-124.
- CHEN Ping, DU Wenjuan. Study on the risk of oscillation caused by similar links in the dynamic characteristics of different types of wind turbines in hybrid wind farms based on new energy[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(12): 114-124.
- [4] 王鑫, 杨德健, 金恩淑, 等. 双馈风电机的虚拟惯性控制优化策略[J]. *智慧电力*, 2022, 50(8): 1-6, 81.
- WANG Xin, YANG Dejian, JIN Enshu, et al. Improved virtual inertial control strategy of doubly-fed induction generator[J]. *Smart Power*, 2022, 50(8): 1-6, 81.
- [5] 杨京渝, 罗隆福, 阳同光, 等. 计及谷时段风电消纳的储能系统平抑风电功率波动控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(10): 131-141.
- YANG Jingyu, LUO Longfu, YANG Tongguang, et al. Smoothing wind power fluctuation control strategy for an energy storage system considering wind power consumption in the valley period[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 131-141.
- [6] 陈金玉, 陈大玮, 张抒凌, 等. 面向风电功率波动平抑的储能系统鲁棒模型预测控制[J]. *供用电*, 2023, 40(8): 28-33.
- CHEN Jinyu, CHEN Dawei, ZHANG Shuling, et al. Robust model predictive control of energy storage system for wind power fluctuation smoothing[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(8): 28-33.
- [7] ENTSO-E. The inertia challenge in Europe—present and long-term perspective[R]. ENTSO-E, 2021.
- [8] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(4): 34-41.
- FAN Chen, YAO Jianguo, ZHANG Qibing, et al. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(4): 34-41.
- [9] 徐波, 俞向栋, 杨逸欣, 等. 基于多智能体系统的分布式风储协同频率控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(19): 13-24.
- XU Bo, YU Xiangdong, YANG Yixin, et al. Distributed wind-storage coordinate frequency control strategy based on a multi-agent system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(19): 13-24.
- [10] 李志军, 郭燕龙, 苗庆玉. 基于解析法的高比例可再生能源系统惯量支撑储能配置[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(11): 11-18.
- LI Zhijun, GUO Yanlong, MIAO Qingyu. Analytical energy storage configuration for grid inertial support in presence of renewable energy storage[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(11): 11-18.
- [11] 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.
- [12] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T 40595—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- National Grid Operation and Control Standardization Technical Committee. Guide for technology and test on primary frequency control of grid-connected power resource: GB/T 40595—2021[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.
- [13] National Grid Electricity System Operator Limited. The grid code[EB/OL]. (2021-09-01)[2022-07-12]. <https://www.nationalgrideso.com/document/162271/download>.
- [14] 苏嘉豪, 蔺红, 樊艳芳. 基于变下垂系数的风电全直流输电系统一次调频协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(8): 55-64.
- SU Jiahao, LIN Hong, FAN Yanfang. Primary frequency regulation coordination control strategy of a wind power all-DC transmission system based on variable droop coefficient[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(8): 55-64.
- [15] 张冠锋, 杨俊友, 孙峰, 等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(22): 225-232.
- ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, SUN Feng, et al. Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control[J]. *Transactions*

- of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 225-232.
- [16] 王宇焱, 邱晓燕. 考虑加快电网频率恢复的风电机组自适应虚拟惯性控制策略[J]. 可再生能源, 2023, 41(4): 514-521.
WANG Yuyan, QIU Xiaoyan. Adaptive virtual inertia control strategy of wind turbine considering accelerating grid frequency recovery[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(4): 514-521.
- [17] 徐鹏超, 李琰, 田新首, 等. 附加转速优化虚拟惯性控制的双馈风机一次调频研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9400-9407.
XU Pengchao, LI Yan, TIAN Xinshou, et al. Primary frequency regulation of doubly-fed induction generator based on additional speed optimization virtual inertia control[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(23): 9400-9407.
- [18] 边晓燕, 印良云, 丁炆, 等. 基于 DFIG 虚拟惯量与下垂控制的微电网调频优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 452-460.
BIAN Xiaoyan, YIN Liangyun, DING Yang, et al. Micro-grid frequency modulation optimization based on DFIG virtual inertia and droop control[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(9): 452-460.
- [19] 颜湘武, 孙雪薇, 崔森, 等. 基于转子动能与超级电容器储能的双馈风电机组惯量和一次调频改进控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊 1): 179-190.
YAN Xiangwu, SUN Xuewei, CUI Sen, et al. Improved control strategy for inertia and primary frequency regulation of doubly fed induction generator based on rotor kinetic energy and supercapacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 179-190.
- [20] 许益恩, 张新松, 李大祥, 等. 基于改进下垂控制的双馈风电机组频率控制策略[J]. 可再生能源, 2023, 41(1): 107-113.
XU Yien, ZHANG Xinsong, LI Daxiang, et al. Frequency control strategy of DFIG based on improved droop control[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(1): 107-113.
- [21] LEE J, MULJADI E, SORENSEN P, et al. Releasable kinetic energy-based inertia control of a DFIG wind power plant[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 279-288.
- [22] SIGRIST L, EGIDO I, ROUCO L. A method for the design of UFLS schemes of small isolated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 951-958.
- [23] SHI Q, LI F, CUI H. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamics studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6355-6367.
- [24] 张祥宇, 胡剑峰, 付媛, 等. 风储联合系统的虚拟惯量需求与协同支撑[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 672-685.
ZHANG Xiangyu, HU Jianfeng, FU Yuan, et al. Virtual inertia demand and collaborative support of wind power and energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 672-685.
- [25] LÜ X, JIA Y, XU Z. A novel control strategy for wind farm active power regulation considering wake interaction[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 618-628.
- [26] 肖亮, 陈亦平, 伍阳阳, 等. 风电场快速调频技术的工程实践及关键参数取值[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2536-2548.
XIAO Liang, CHEN Yiping, WU Yangyang, et al. Engineering practice and key parameter selection for fast frequency regulation technology of wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2536-2548.

收稿日期: 2024-05-21; 修回日期: 2024-08-21

作者简介:

钱敏慧(1982—), 女, 博士研究生, 教授级高级工程师, 研究方向为可再生能源发电并网建模验证、运行控制技术研究及系统开发; E-mail: minhui_qian@163.com

张建胜(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为能源清洁高效转化技术;

秦文萍(1972—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统可靠性/稳定性分析、微电网运行与控制、交直流混合微电网保护等。

(编辑 许威)