

频率连续跌落故障下风电系统调频控制策略

马骏超¹,王晨旭¹,孙丹²,彭琰¹,张泽宇²,杨滢³

(1. 国网浙江省电力科学研究院,浙江 杭州 310014;

2. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;

3. 国网浙江省电力有限公司电力调控中心,浙江 杭州 310000)

摘要:针对电网频率连续跌落故障场景下风电系统在一次调频控制结束后可能存在的频率二次跌落问题,分析了直驱式风电系统的一次调频控制原理,提出了以前、后采样时刻频率变化率乘积和差值组合作为判据的直驱式风电系统一次调频控制策略。根据所建立的判据,通过综合考虑风机转速、频率偏差和频率收敛速度,对直驱式风电系统在不同频率响应阶段的下垂系数进行调整,以实现风电系统的主动频率支撑和柔性调频退出。基于Matlab/Simulink对直驱式风电系统进行了仿真研究,验证了所提控制策略的有效性。

关键词:电网频率连续跌落;直驱式风电系统;下垂系数;一次调频控制

中图分类号:TM71 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25468

Frequency Regulation Control Strategy for Direct-drive Wind Power Systems Considering Continuous Frequency Drop

MA Junchao¹, WANG Chenxu¹, SUN Dan², PENG Yan¹, ZHANG Zeyu², YANG Ying³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

3. Power Regulation Center of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.,
Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: In response to the potential frequency secondary drop problem of direct-drive wind power systems in the scenario of continuous frequency drop faults in the power grid, the principle of primary frequency regulation of direct-drive wind power systems was analyzed. A primary frequency regulation control strategy for direct-drive wind power systems was proposed based on the product and difference combination of frequency change rates at pre- and post-sampling times. According to the established criteria, the droop coefficient of the direct-drive wind power system in different frequency response stages was adjusted by comprehensively considering the fan speed, frequency deviation, and frequency rate of convergence, to realize the active frequency support and flexible frequency modulation exit of the wind power system. A simulation model of a direct-drive wind power system was established in Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: continuous drop in grid frequency; direct-drive wind power system; droop coefficient; primary frequency regulation control

随着新能源技术的不断发展,风力、光伏等新型资源在我国新能源系统中的渗透率正不断增加,新能源机组也逐步取代了部分传统电力系统中的火电机组^[1-2]。新能源机组具有污染少、清洁等特点,但其往往依靠并网变流器进行并网运行。厂商为了追求经济利润最大化,通常会设定

新能源机组工作在最大功率跟踪控制模式下,这种控制模式也造成了新能源机组的输出能力和电网频率的解耦,降低了电力系统在电网频率发生故障情况下的惯量响应和频率支撑能力^[3]。

其中,以风力为代表的高渗透率新能源系统使电力系统的频率稳定性受到越来越大的挑战,

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS23000F)

作者简介:马骏超(1989—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为新能源涉网与综合能源调控技术,Email:mjc_zju@sina.com

通讯作者:孙丹(1975—),女,博士,教授,主要研究方向为新能源发电控制技术、电机系统及其控制,Email:sundan@zju.edu.cn

电力系统对风电系统频率支撑性能的要求逐渐提高。为保障高渗透率风电系统的高效稳定工作,风电机组主动参与电力系统的一次调频控制过程正逐渐成为新能源技术发展的趋势^[4-7]。文献[8-10]对大规模风电场和对应风电机组在电力系统中参与一次调频的相关控制策略进行了说明。文献[11]对风电系统装配储能实现并网运行的控制策略进行了系统分析。此外,在文献[12-14]中,研究人员对结合有功备用、虚拟惯量响应等的双馈风电机组控制方法也进行了分析。尽管上述文献针对风机参与电力系统一次调频提出了诸多性能良好的控制方案,但风电系统的一次调频控制逐渐结束后,系统有功功率极易发生二次跌落,不利于系统频率恢复,可能对系统造成潜在功率缺额的不利影响。针对这一问题,文献[15]进一步分析了风电系统参与一次调频控制结束后可能引起频率二次跌落的原因。现有文献针对频率二次跌落的抑制方法主要集中在转速恢复、目标功率值恢复过程设计以及控制参数调整等方面。

从风电场的层面来看,文献[16-17]提出了风电场的虚拟惯量控制方法来抑制电网频率的二次跌落。考虑到预留有功备用可以充分弥补系统功率缺额问题,文献[18]中设定场站的一些风机运行在偏离最大功率追踪的备用状态,实时保留一部分可避免频率二次跌落的功率储备。此外,文献[19]引入储能装置和风电场的设备进行协同有功功率控制,实现系统在频率故障场景下的调频及退出控制。上述方法均是从场站层面设计系统频率支撑和退出方案。

落实到具体机组,从风电机组设备层面来看,文献[20]通过灵活调整系统的控制系数来实现风机的频率支撑和退出控制,以保证风机参与一次调频结束后转速和频率都可以恢复到预期状态。文献[21]采用风电-储能共同参与调频的控制策略,在风电机组退出一次频率调节后,由储能装置输出功率从而抑制频率二次跌落。文献[22]提出一种基于扩张状态观测器的风电系统频率支撑策略,通过扩张观测器评估风电机组输入和输出的机械功率,抑制频率二次跌落,然而风电机组机械功率的评估精确性有待进一步提升,同时也需要通过机械功率值对频率跌落时间进行估算。文献[23]分析了风电机组在一次调频控制结束后可能存在的功率和机械载荷振荡问

题,提出一种基于指数函数进行功率参考值趋近的风机转速恢复方法,有效抑制了风机恢复期间的频率跌落问题。文献[24]提出了一种风电机组的分段变下垂系数控制策略,在电网频率达到最低点后,设置下垂系数随时间变化,保证风机能够逐渐回到最大功率跟踪控制并抑制频率二次跌落。文献[23-24]所提的风电机组功率参考值/下垂系数随时间逐渐收敛的调频控制策略虽具有良好的控制效果,但是依赖于对调频退出时间的设置,在多变频率的场景下适应性较差。例如,在电网输电过程,尤其是在偏远地区,可能会出现电网短路故障或者高压输电的直流闭锁现象,同时也会引起系统频率的波动,且短路故障出现前后功率变化也会导致频率连续跌落的场景^[25]。因此,设计一种可以不依赖风电机组机械功率值进行频率跌落时间的计算,同时又适用于频率连续跌落故障场景的一次调频控制策略,对实现风电系统的主动频率支撑和调频柔性退出具有重要的理论意义和工程价值。

为实现频率连续跌落场景下风电系统不依赖机械功率值进行频率跌落时间计算的一次调频控制,本文针对直驱式风电系统提出了一种以前、后采样时刻的电网频率变化率的差值和乘积组合作为判据的一次调频下垂系数调整策略。所提控制策略可避免对机械功率值的依赖,直接根据电网频率的变化情况来判断系统所处的频率响应阶段,并同时结合风机转速、电网频率偏差和电网频率变化情况来调整下垂系数,以满足电网频率连续跌落场景下风电系统的一次调频控制及频率恢复后期的调频退出控制,提升风电系统的频率支撑控制和恢复效果。仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

1 直驱式风电系统一次调频控制原理

风电系统在参与一次调频控制的过程中,频率自身波动程度和有功功率的缺额密切相关。风电系统的有功功率缺额越小,频率波动程度越低;反之则越大,甚至导致频率的二次跌落。本节根据直驱式风电系统的一次调频控制原理,对风电系统在参与一次调频控制从频率稳定运行到系统受到功率扰动导致频率跌落,再到频率逐渐恢复的全过程中的频率变化和恢复过程导致的频率二次跌落问题进行分析。

1.1 系统数学模型及控制原理

在直驱式风电系统中,风力机捕获的机械功率可以表示为^[23]

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p v^3 \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为叶轮半径; v 为风速; C_p 为风能利用系数。

C_p 是关于叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数,具体的数学关系可以表示为

$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

其中

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

叶尖速比 λ 计算式为

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{Gv} \quad (3)$$

式中: ω_r 为电机转速; G 为传动比。

根据式(1)~式(3),常规运行过程中直驱式风电机组的输出功率为

$$P_{opt} = \begin{cases} k_{opt} \omega_r^3 & \omega_{cut} \leq \omega_r < \omega_{con} \\ \frac{P_{max} - k_{opt} \omega_r^3}{\omega_{max} - \omega_1} (\omega_r - \omega_{max}) + P_{max} & \omega_{con} \leq \omega_r < \omega_{max} \\ P_{max} & \omega_{max} \leq \omega_r \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_{opt} 为最优功率系数; ω_{cut} 为切入转速; ω_{con} 为恒转速控制切入点; ω_{max} 为最大允许转速。

直驱式风机可以通过在风机输出功率值 P_{opt} 迭加和频率偏差 Δf 、频率随时间的变化率 df/dt 相关的额外附加功率 ΔP ,来控制风机释放自身转子动能实现风电系统的一次调频控制。叠加 ΔP 后的风机功率参考值 P_{ref} 可以表示为

$$P_{ref} = P_{opt} + \underbrace{k_p \Delta f + k_j \frac{df}{dt}}_{\Delta P} \quad (5)$$

式中: k_p, k_j 分别为电网频率差值 Δf 和频率变化率 df/dt 的控制系数。

电网频率差值 Δf 为电网频率实际值和频率参考值之间的偏差。对比同步发电机的转子运动方程, k_p 的作用等同于同步发电机的阻尼系数, k_j 的作用等同于同步机惯性时间常数,即风电机组在控制环节中模拟了同步发电机的物理过程。考虑到基于最大功率追踪的风机功率值 P_{opt} 和当前时刻的风速和系数相关,在此基础上和频率偏差经过虚拟惯量响应计算得到的附加

功率进行叠加得到实时的风机功率参考值,如下式所示:

$$P_{ref_in} = P_{t_0} + (k_p \Delta f + k_j \frac{d\Delta f}{dt}) \quad (6)$$

式中: P_{t_0} 为 t_0 时刻的直驱式风电机组瞬时功率。

基于虚拟惯量响应的直驱式风电机组并网控制框图如图1所示。

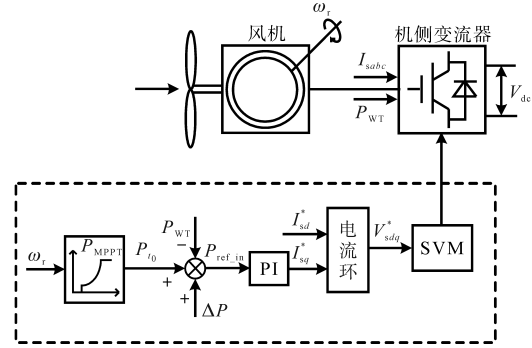


图1 直驱式风电机组并网控制框图

Fig.1 Grid connection control block diagram of direct-drive wind turbine based on virtual inertia response

由图1不难发现,当电网频率偏差值不超过一次调频死区时,直驱式风机正常运行,风机输出功率参考值需要根据最大功率跟踪曲线进行计算。当电网频率偏差值超过一次调频死区时,在当前风机输出功率参考值的基础上,迭加虚拟惯量响应的附加功率参考值作为风机的参考输出功率参考值,进而实现直驱式风机对系统频率的主动支撑。当前风电机组的有功输出主要是将惯性响应与下垂响应叠加在一起作为系统响应频率偏差的支撑策略。对于下垂参数 k_p ,其数值会直接影响到系统频率响应效果,如图2所示。从图2中可以看出,在相同负载扰动(负荷突增)的情况下, k_p 越大, ΔP 越大,风机参与一次调频的程度越深,频率跌落程度越小。

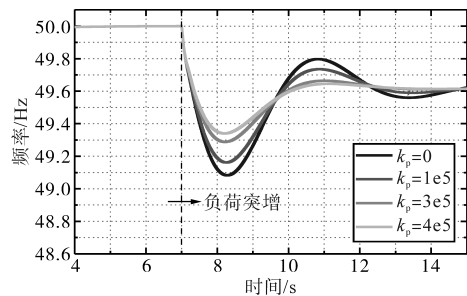


图2 不同下垂系数对频率的影响

Fig.2 Influence of different droop coefficients on frequency

1.2 系统的频率响应模型

如果不考虑风电系统中不同节点和风机的频率动态变化情况,全面分析风机的惯量响应特

性,风机以下垂控制的形式参与风电系统的一次调频控制,可以得到系统的频率响应模型如图3所示^[26-27]。图3中, T_s 和 T_G 为风电系统和调速系统的综合惯性时间常数, K_C 为发电机的静态特性系数, K_L 为减载系数, k_p 和 k_j 为风电系统的下垂系数和惯量系数, ΔP_d 为风电系统的功率扰动值。

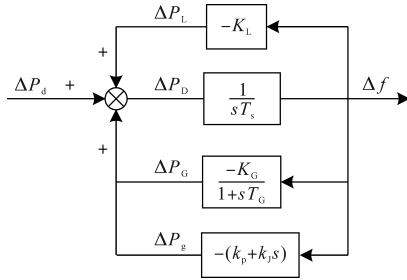


图3 系统频率响应模型

Fig.3 System frequency response model

根据图3所示的风电系统频率响应模型可以看出,风电系统的频率特性方程可以表示为

$$\Delta P_D + \Delta P_L + \Delta P_G + \Delta P_g = \Delta P_d \quad (7)$$

风机的频率特性方程可以表示为

$$\Delta f(s) = \frac{\Delta P_d}{s} \frac{1}{K_L + k_p + s(T_s + k_j) + K_G/(1 + sT_G)} \quad (8)$$

根据式(8),当直驱式风机在经历频率跌落到最低点并逐渐回升的过程中,风机的转速也在逐渐恢复,而电网频率二次跌落深度和风机转速恢复阶段的有功出力有着密切联系。如果在风机转速恢复的过程中,功率值的衰减程度小于风电系统的不平衡功率,则系统不存在功率缺额,也不会造成频率二次跌落;反之则可能造成频率的二次跌落^[28]。

综上,风电系统参与一次调频控制运行的全过程为:风电系统稳定运行且频率没有较大波动时,可定义风电系统处于频率稳定阶段,电网调频不需要进行任何风机的调频动作;当风电系统受到如图3所示的干扰 ΔP_d 而发生频率跌落且没有达到频率最低值时,可定义风电系统处于频率支撑阶段,此时风机需要在转速安全范围内输出最大的有功以提供辅助的频率主动支撑;当风电系统频率到达最低值后上升时,定义风电系统处于频率恢复阶段,此时风机需要结合实际运行情况逐渐退出一次调频控制,实现风机的转速恢复。直驱式风电系统在经过完整的一次调频全过程后,可实现新能源系统对电网提供频率主动支撑的控制目标。

2 不同频率阶段风电系统的下垂系数调整

直驱式风电系统参与一次调频控制过程中,通过下垂控制环节计算频率偏差所对应的附加功率,并迭加在基于最大功率追踪计算得到的功率参考值上。在风电系统实现频率支撑后需要逐渐恢复到原来的最大功率追踪计算得到的功率参考值,需要将下垂控制环节的下垂系数逐渐减小到零,这样风机可以实现在退出调频控制后输出的附加有功功率为零,从而实现转速恢复到调频之前的最优状态。如果突然将下垂系数减小,那么极易导致系统有功功率缺额过大导致频率二次跌落。基于此,需要设计一种判据来实时判断风电系统和电网频率实际情况,并对下垂系数进行针对性调整。本节首先提出了在频率连续跌落场景下判断风电系统所处不同频率阶段的判据,并设计了频率支撑阶段和频率恢复阶段的下垂系数调整策略。

2.1 风电系统所处频率阶段的判据

在风机系统运行的过程中,频率随时间的变化率 df/dt 可以反映出电网频率的波动程度以及变化趋势。相较于频率偏差, df/dt 可以更全面地展示电网频率实际情况。因此,提出一种通过采集系统当前时刻的频率变化率数值 $(df/dt)_k$ 和前一时刻的频率变化率数值 $(df/dt)_{(k-1)}$ 来建立直驱式风机所处不同调频阶段的判据,并判断风机所处具体频率阶段的方法。

本文所提判据具体原理如下:在风电系统运行的初始阶段,当系统频率偏差不超过一次调频死区($|\Delta f| < 0.033$ Hz)时,系统正常运行。在这种频率稳定的情况下,系统采集到的当前时刻的频率变化率数值 $(df/dt)_k$ 和前一时刻的频率变化率数值 $(df/dt)_{(k-1)}$ 的绝对值都相差不大且近似等于0。但在风电系统实际运行过程中,频率不可能是恒定值,而会存在小幅波动,因此上述数值不可能完全等于0;如果直驱式风电系统受到如图3所示的功率扰动,此时系统频率会发生跌落。当系统的频率偏差超出一次调频死区时,系统采集的当前时刻的频率变化率 $(df/dt)_k$ 和前一时刻的频率变化率 $(df/dt)_{(k-1)}$ 极性相同,因此乘积大于0且快速上升。同时,因为系统频率在这一阶段持续跌落,因此差值始终小于0且逐渐下跌,此后频率持续跌落并逐渐到达最低值;在系统的

频率跌落到最低值后逐渐上升的过程中,系统采集的当前时刻的频率变化率 $(df/dt)_k$ 和前一时刻的频率变化率 $(df/dt)_{(k-1)}$ 的乘积在频率到达最低值的时刻近似为0,而后逐渐增大,同时差值不小于0。基于此,可以看出,通过分析 $(df/dt)_k$ 和 $(df/dt)_{(k-1)}$ 的数值便可以判断系统的频率变化情况。

综上,当风电系统稳定运行且频率没有较大波动时,定义为风电系统处于频率稳定阶段;当风电系统受到干扰而发生频率下跌且未达到频率最低点时,定义为风电系统处于频率支撑阶段;当风电系统频率到达最低点且逐渐恢复时,定义为风电系统处于频率恢复阶段。基于此,可针对风电系统所处的不同频率阶段进行下垂系数的分段优化控制。

首先建立两个判据: $[(df/dt)_k - (df/dt)_{(k-1)}]$ 和 $[(df/dt)_k \times (df/dt)_{(k-1)}]$,即系统采集的当前时刻的 $(df/dt)_k$ 和前一时刻的 $(df/dt)_{(k-1)}$ 之差和当前时刻的 $(df/dt)_k$ 和前一时刻的 $(df/dt)_{(k-1)}$ 的乘积,在频率连续跌落场景下根据判据判断风电系统所处不同频率阶段的过程如下:

1)直驱式风电系统实时采样当前时刻的风机转速值 ω_r 、电网频率偏差值 Δf 、电网频率关于时间的一阶微分 df/dt 和二阶微分 d^2f/dt^2 ,其中, Δf 为电网实际频率 f 和电网频率参考值 f_N 的差值,并将每次采样的上述数值存储在控制器中;

2)设定4个正数阈值 lim_1, lim_2, lim_4 和 lim_5 ,以及1个负数阈值 lim_3 ,作为所提判据的临界数值,从而避免频率波动对频率阶段判断结果产生的影响。对风电系统本次采样时刻和上一次采样时刻的电网频率关于时间的一阶微分数值 $(df/dt)_k$ 和 $(df/dt)_{(k-1)}$ 进行判断,如果当前采样时刻和上一采样时刻的一阶微分数值的乘积 $[(df/dt)_k \times (df/dt)_{(k-1)}]$ 和差值 $[(df/dt)_k - (df/dt)_{(k-1)}]$ 的绝对值都小于 lim_1 ,则认为风电系统进入频率稳定阶段;若 $[(df/dt)_k \times (df/dt)_{(k-1)}]$ 大于 lim_2 且 $[(df/dt)_k - (df/dt)_{(k-1)}]$ 小于 lim_3 ,则认为风电系统进入频率支撑阶段;若 $[(df/dt)_k \times (df/dt)_{(k-1)}]$ 小于 lim_4 ,且 $[(df/dt)_k - (df/dt)_{(k-1)}]$ 大于 lim_5 ,则认为风电系统进入频率恢复阶段。

通过本文所提直驱式风电系统所处不同频率阶段的判据,可在系统运行过程中实时分析频率的变化情况,并根据所判断的系统所处不同频率阶段,进行不同阶段的分段下垂系数控制。

2.2 风电系统在频率支撑阶段的下垂系数调整

当直驱式风电系统利用风机的转子动能提供附加有功功率时,风机的转速会随之逐渐下降。为了保证当一次调频结束时,风机的转速可以回到频率故障发生前的状态从而实现系统最大功率追踪,当频率在到达最低点并慢慢上升的过程中,风机需退出频率支撑回到初始阶段的最大功率追踪状态。

要使风机在参与一次调频控制后将输出功率恢复到最优模式,需将风电系统的下垂系数值逐渐减少直到零。为了避免系统频率二次跌落,需使下垂系数逐渐平滑减小至零。基于此,本文提出了一种适用于风电系统频率连续故障场景下的转速恢复的系统控制策略。

设定风电系统风机转速值的跌落程度值为 $a = \omega_{MPPT} - \omega_r$,风机转速值的下限阈值为 $b = k_{min} \times \omega_{MPPT}$,风机转速值的安全阈值为 $c = k_{safe} \times (\omega_{MPPT} - b)$,其中, ω_{MPPT} 为风电系统的风机运行在最大功率追踪模式下的转速值; k_{min} 为阈值系数,并且满足 $0 < k_{min} < 1$; k_{safe} 为安全阈值系数,且满足 $0 < k_{safe} < 1$ 。根据电网实际情况和用户期望数值,建立风电系统的电网频率偏差值安全阈值 Δf_{safe} ,风电系统在频率支撑阶段的下垂系数调整过程如图4所示。

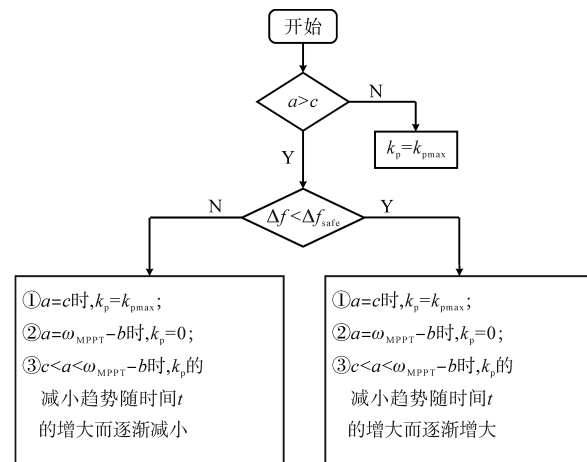


图4 系统风电系统在频率支撑阶段的下垂系数调整

Fig.4 Diagram of droop coefficient adjustment of the wind power system during the frequency support stage

为了保证风机转速的运行安全及频率偏差阈值上限,本文提出根据安全阈值系数 k_{safe} 和风电系统的电网频率偏差值安全阈值 Δf_{safe} 来调整风电系统的虚拟惯量响应下垂系数的方法。由图4可知,当频率跌落时,如果风机的转速尚在安全范围内,那么设定下垂系数为最大值来提升风电系统的频率支撑能力。

而一旦风机转速超出安全范围,那么需要综合考虑转速变化情况和频率偏差来调整下垂系数。如果转速持续降低,那么下垂系数需要逐渐减小来实现对转速跌落趋势的抑制。其中,根据频率偏差的具体情况,下垂系数的调整趋势如下:

1) 如果 $\Delta f \geq -\Delta f_{\text{safe}}$, 说明此时风电系统的频率偏差尚在安全阈值内, 此时下垂系数随转速降低而减小的曲线对外呈现“凹函数”特性, 可以加快风机转速跌落过程中下垂系数的减小速度, 在不影响频率支撑能力的前提下逐步实现风机转速恢复;

2) 如果 $\Delta f < -\Delta f_{\text{safe}}$, 说明此时风电系统的频率偏差超出了安全阈值, 此时下垂系数随转速降低而减小的曲线对外需要呈现“凸函数”特性, 以减缓下垂系数随转速降低的减小速度, 保证风电系统尽可能多地输出有功功率。这样可以在保证风机转速安全的前提下实现最大的有功出力, 提升风电系统的频率支撑能力。

结合图4及上述理论分析说明, 下垂系数 k_p 的表达式如下所示:

$$k_p = \begin{cases} k_{p_{\max}} & a \leq c \\ -\frac{1}{\sqrt{1-k_{\text{safe}}}} \times \sqrt{(a/c) - k_{\text{safe}}} + k_{p_{\max}} & a > c \text{ 且 } \Delta f \geq -\Delta f_{\text{safe}} \\ -\frac{1}{(1-k_{\text{safe}})^2} \times [(a/c) - k_{\text{safe}}]^2 + k_{p_{\max}} & a > c \text{ 且 } \Delta f < -\Delta f_{\text{safe}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $k_{p_{\max}}$ 为下垂系数值的最大值。

由式(9)可知, 在直驱式风机进入频率支撑阶段后, 下垂系数只与风机转速相关。此方法可以保证风电系统在频率波动的初始阶段释放更多的动能以提高系统频率最低点, 同时, 下垂系数随实时转速的下降而减小可有效防止风机的过度减速, 确保风机稳定运行。

2.3 风电系统在频率恢复阶段的下垂系数调整

当直驱风机第一次进入频率恢复阶段时, 设定下垂系数 k_p 逐渐减小。在直驱风机第一次进入并处于频率恢复阶段的过程中, 一旦检测到频率再次发生跌落, 则认为风电系统第二次进入频率支撑阶段, 此时 k_p 的调整和2.2节一致。

如果风电系统第二次进入频率恢复阶段, 为合理规划 k_p 的收敛速率以保证风机在转速恢复过程不引起系统频率二次跌落, 本小节提出一种以系统频率偏差值为自变量计算下垂系数, 并根

据频率变化率的二阶微分对下垂系数的曲线进行微调的方法。下垂系数 k_p 可表达如下:

$$k_p = k_1 \cdot \Delta f + k_2 - k_3 \cdot \frac{d^2 f}{dt^2} \quad (10)$$

式中: k_1, k_2, k_3 均为调整系数。

同时, 记录风电系统第二次进入频率恢复阶段的时间点 t_1 , 并设置时间尺度 Δt , 用于表示系统设置的期望频率最大支撑时间。记录当前时刻时间点 t , 判断当 $t = t_1 + \Delta t$ 时风电系统的下垂系数 k_p 是否为零。若 k_p 不为零, 则设置风电系统的下垂系数 k_p 随时间逐渐减小直至为零, 以同时满足电网调度层对风电系统退出调频的时间设定。其中, k_1 是频率偏差项的调整系数, 通过缩放 Δf 来调整下垂系数; k_2 是 k_p 的限幅以保证 k_p 始终处于有效范围; k_3 是频率随时间变化率的二阶微分对应的调整系数, 根据频率的变化趋势对 k_p 进行调整。具体而言, Δf 变化过程中, $|k_1|$ 越大, k_p 变化程度越大; k_3 越大, k_p 受 $d^2 f/dt^2$ 的影响程度越大。

通过式(10)可知, 所提方法在频率恢复阶段的下垂系数调整会随着频率偏差的收敛逐渐减小到0, 同时通过 $d^2 f/dt^2$ 对 k_p 进行微调: 当频率恢复速度较快时, 可以增加 k_p 的收敛速度, 反之则减缓 k_p 的收敛速度。进一步而言, 在频率恢复阶段, 风电系统的下垂系数与频率跌落深度和频率恢复趋势相关。因此, 所提方法在风电系统处于频率恢复阶段时可以通过合理调整下垂系数避免系统在频率连续跌落故障场景下处于恢复过程中的频率二次跌落。

2.4 风电系统在频率连续跌落场景下的下垂系数调整

结合2.1~2.3节内容, 直驱式风电系统在参与一次调频控制过程中的下垂系数调整步骤如下:

1) 判断风电系统是否首次进入频率稳定阶段, 如果首次进入频率稳定阶段, 则风电系统的下垂系数值为零;

2) 判断风电系统是否首次进入频率支撑阶段, 如果首次进入频率支撑阶段, 则根据风机转速值 ω_r 来计算风电系统的下垂系数值 k_p ; 判断风电系统是否首次进入频率恢复阶段, 如果首次进入频率恢复阶段, 则设置风电系统的下垂系数值 k_p 随时间逐渐减小;

3) 判断风电系统是否第二次进入频率支撑阶段, 如果第二次进入频率支撑阶段, 则根据风机转速值 ω_r 来计算所述风电系统的下垂系数值

k_p ;判断风电系统是否第二次进入频率恢复阶段,如果第二次进入频率恢复阶段,则根据当前时刻风机转速值 ω_r 、电网频率差值 Δf 、所述电网频率关于时间的二阶微分数值 d^2f/dt^2 以及设置的时间尺度 T_{set} 来计算风电系统的下垂系数 k_p ,并最终完成整个过程的风电系统一次调频控制。其中, T_{set} 是根据收益、频率支撑及退出需求设定的支撑恢复时间。

综上所述,图5为风电系统在频率连续跌落场景下根据判据判断风电系统所处不同频率阶段的过程以及对应的下垂系数调整过程的示意图。

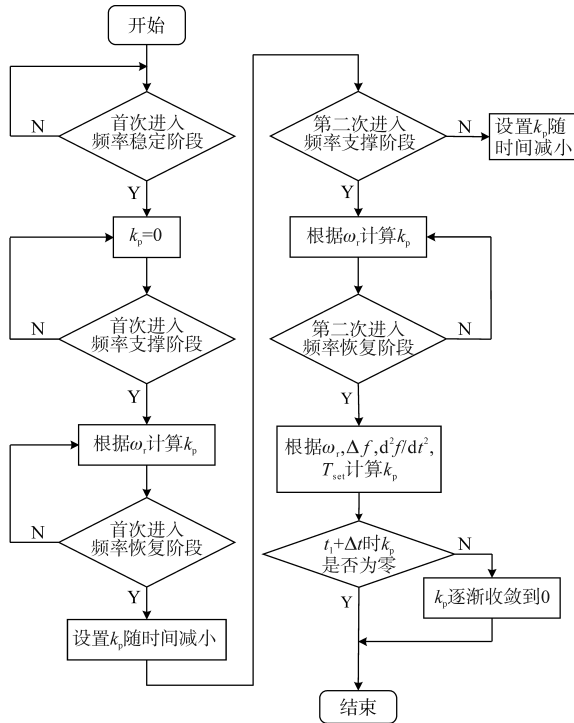


图5 风电系统在频率支撑阶段的下垂系数调整
Fig.5 Diagram of droop coefficient adjustment of the wind power system during the frequency support stage

3 仿真案例分析

为了验证本文所提控制策略的有效性,本文建立了 Matlab/Simulink 的直驱风电系统仿真模型。仿真中的拓扑主要包括直驱风机、由机侧逆变器和网侧逆变器组成的全功率逆变器、LCL滤波器和 20 kV/690 V 变压器。风机通过背靠背逆变器和 LCL 滤波器连接到具有同步机特性的大电网,如图6所示。仿真参数如下:直驱风机的定子电阻 $0.9e-3 \Omega$,定子 d 轴电感 $1.586e-3 H$,定子 q 轴电感 $2.362e-3 H$;电网模块的同步机组的额定功率 3 MW,线电压 20 kV,额定频率 50 Hz。后续所有仿真均为模拟电网频率连续跌落场景,具

体仿真操作过程为:在 $t=12 s$ 之前系统的有功负荷为 3 MW,在 $t=12 s$ 突增 1 MW 负荷,在 $t=14 s$ 进一步突增 0.5 MW 负荷。

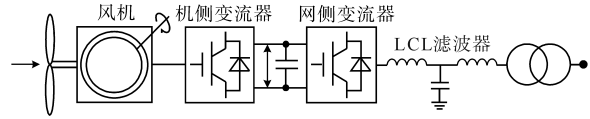


图6 直驱式风电机组并网结构图

Fig.6 Grid connection structure of direct-drive wind turbines

文中以文献[24]作为传统方法与本文所提方法进行了对比研究,仿真结果如图7~图9所示。其中,图7为传统下垂系数控制和本文所提下垂系数调整方法的仿真结果,通过结果对比来验证不同频率阶段的下垂系数调整方法的有效性和优越性;图8为频率跌落场景下所提风电系统判据的仿真结果,用来验证本文所提风电系统频率阶段判据的有效性;图9对本文所提风电系统的判据和不同频率阶段的下垂系数调整策略进行了综合验证。

3.1 所提下垂系数调整方法

在对传统转速恢复下垂控制方法的仿真中,风速设定为 10 m/s。考虑到仿真中的电压源模块无法直接影响风电系统的频率暂态过程,因此在仿真中设置同步机组代表的大电网充当电网模块,并通过设定和突加功率负荷来改变系统的频率值。图7所示为风电系统频率连续跌落故障下,传统方法和所提方法以时间作为判据的频率、风速和下垂系数的仿真结果。仿真中设定当

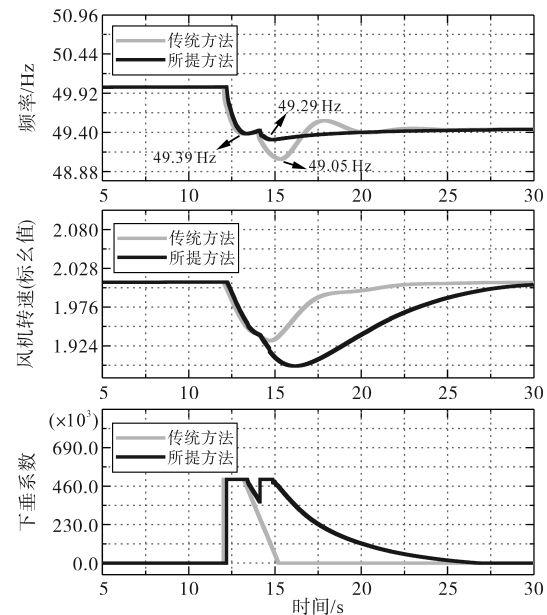


图7 传统方法和所提方法的下垂系数调整结果
Fig.7 Simulation results of droop coefficient for traditional and proposed methods control

风电系统进入频率恢复阶段后,下垂系数在3 s减小到零;同时设定下垂系数值的最大值为 $5e5$ 。从图7中灰线可以看出,当频率在12 s发生跌落时,此时系统转速尚在安全范围,因此下垂系数值保持在最大值不变,风机输出较大的有功功率来提升频率最低点。当频率到达最低点并开始上升时,此时下垂系数值逐渐减小。当风电系统负荷进一步突变导致尚未完全恢复的频率再次跌落时,此时由于下垂系数值还在不断减小,因为风电系统的频率支撑能力大大减弱,导致频率最低点远低于下垂系数值设定为最大值所对应的频率最低点,降低了风电系统在参与一次调频过程中的经济效益和控制性能。

为了对本文所提方法在直驱风机处于不同频率阶段时的下垂系数控制方法的有效性进行验证,设定仿真中根据时间点进行下垂系数调整,仿真结果如图7中黑线所示。在仿真中风电系统的虚拟惯量响应的下垂系数值中 k_1 设定为 $(-100/13)$, k_2 设定为 $(-57/13)$, k_3 设定为0.01。从图中可以看出,当风电系统首次进入频率支撑阶段时,由于转速没有超过安全范围,因此下垂系数一直保持在最大值 $5e5$,保证风机足够出力来提升频率最低点;当系统首次进入频率恢复阶段时,下垂系数随时间逐渐减小;当系统第二次进入频率支撑阶段时,下垂系数调整回 $5e5$,保证了风机的频率支撑能力;当系统第二次进入频率恢复阶段时,下垂系数逐渐减小到零,同时在风机

退出调频控制后,风机转速逐渐恢复到频率波动前的数值,频率也稳定到了新的状态。

通过对比图7的黑灰线,可明显看出风电系统处于频率故障场景时,所提方法的电网频率跌落的跌落深度(49.29 Hz)要小于传统方法的跌落深度(49.05 Hz)。因此,本文所提下垂系数调整方法相比传统方法具有显著的调频性能提升。考虑到风机实际运行过程中难以像仿真过程中直接提前获得所有频率故障发生的具体时刻,因此需要结合本文所提不同频率阶段的判据来综合模拟风机真实运行场景下的下垂系数调整和调频控制。

3.2 所提频率阶段判据

为了验证本文所提风机处于不同频率阶段的判据的有效性,图8为不同下垂系数值所对应的频率跌落场景下的判据仿真结果。其中,图8a为下垂系数值为 $1.5e5$ 时,当风电系统发生连续故障情况下的电网频率值、 $[(df/dt)_k \times (df/dt)_{(k-1)}]$ 、 $[(df/dt)_k - (df/dt)_{(k-1)}]$ 、频率阶段标志位和频率恢复阶段标志位的仿真结果;图8b为下垂系数值为 $5e5$ 时的相应仿真结果。从图8可看出,当初始阶段系统频率偏差没有超过一次调频死区时,系统正常运行,此时系统采集的当前时刻 $(df/dt)_k$ 和前一时刻的 $(df/dt)_{(k-1)}$ 的绝对值都基本等于0;当系统的频率偏差超出一次调频死区并且频率在下降阶段,此时系统采集的当前时刻 $(df/dt)_k$ 和前一时刻的 $(df/dt)_{(k-1)}$ 的乘积大于0,且差值小于0;当

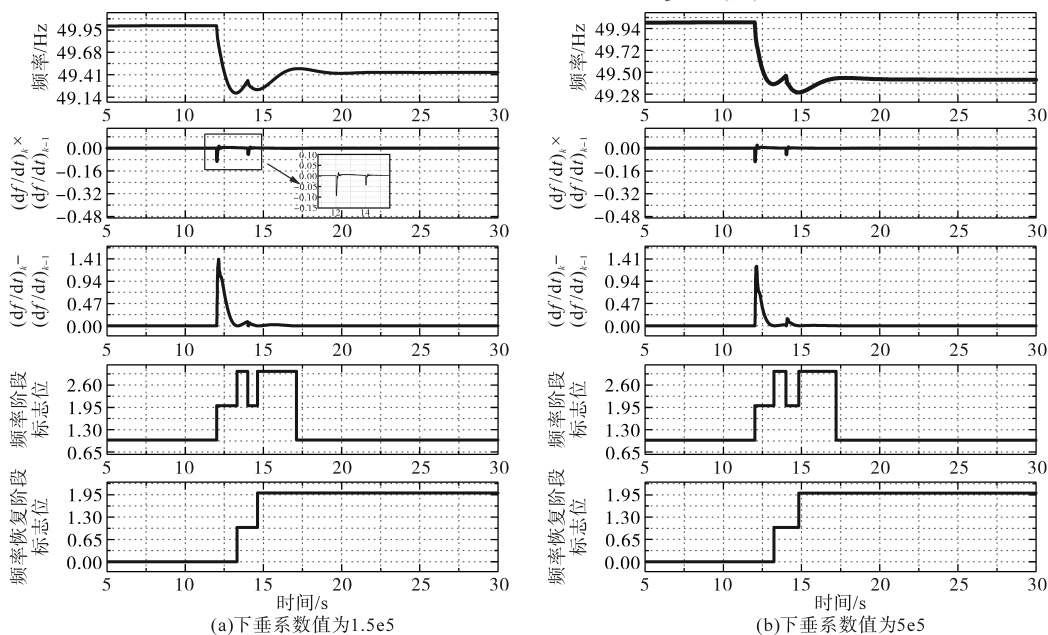


图8 频率跌落场景下的判据仿真结果

Fig.8 Simulation results of criteria in frequency drop scenarios

系统的频率跌落到最低点之后逐渐恢复的过程中,此时系统采集的当前时刻 $(df/dt)_k$ 和前一时刻的 $(df/dt)_{(k-1)}$ 的乘积小于0,且差值大于0。基于此,通过分析 $(df/dt)_k$ 和 $(df/dt)_{(k-1)}$ 的数值可以判断系统的频率变化情况,验证了2.1节所提方法的有效性和可行性。

图8中频率阶段标志位和频率恢复阶段标志位分别代表风电系统进入的不同频率阶段的标志,以及风电系统第几次进入频率恢复阶段的标志。其中,当频率阶段标志位的值为1时,代表风电系统处于频率稳定阶段;当频率阶段标志位的值为2时,代表风电系统处于频率支撑阶段;当频率阶段标志位的值为3时,代表风电系统处于频率恢复阶段。此外,当频率恢复阶段标志位的值为1时,代表风电系统第一次进入频率恢复阶段。

根据图8a中 $[(df/dt)_k \times (df/dt)_{(k-1)}]$ 的局部放大图,当电网频率受到干扰而发生频率故障时,在频率支撑和频率恢复阶段, $[(df/dt)_k \times (df/dt)_{(k-1)}]$ 的变化趋势和2.1节的理论分析吻合,验证了所提频率阶段判据的可行性。

3.3 模拟风机真实运行场景的下垂系数调整

图9所示为模拟风机运行真实场景下本文所提风机下垂系数调整方法的频率主动支撑和柔性调频退出仿真结果,其中设定的下垂系数最大值为 1.5×10^5 。仿真中,风电系统的虚拟惯量响应的下垂系数 k_1 设定为 $-10/3$, k_2 设定为 -2 , k_3 设定为 0.001 。由图9可以看出,初始条件下,0 s—12 s时段,风速为10 m/s,此时频率处于稳定状态,风电系统的下垂系数保持为零,实现直驱风机的最大功率追踪控制;当频率发生连续故障时,所提方法

也可以控制系统的下垂系数,并设定在17 s时,判断下垂系数是否已经恢复到零,如果未恢复则随时间逐渐减小下垂系数直至为零,实现风电系统根据自主设定的风电系统期望频率支撑时间设置。如图9所示,本文所提风电系统所处不同频率阶段的判据和对应于不同频率阶段的下垂系数调整方法,相较于传统方法则有效提升了风电系统参与一次调频控制的性能,实现了真实场景下风电系统的主动频率支撑和柔性调频退出。

4 结论

本文提出了一种以前、后采样时刻的电网频率变化率的差值和乘积的组合结果作为判据的直驱风电系统下垂系数恢复策略,通过理论分析和仿真研究证明了所建立的判据可以对风电系统所处的不同频率阶段进行判断。此外,提出了通过综合考虑风机转速、电网实际频率和电网频率给定值以及电网频率随时间的变化速度情况,对不同频率阶段直驱风电系统的控制系数进行调整的方法,实现了电网频率连续跌落故障场景下的一次调频控制。仿真结果验证了所提方法提升了传统方法在风电系统频率连续跌落场景下的频率支撑能力,并最终实现了真实场景下风电系统的主动频率支撑和柔性调频退出。

参考文献

- [1] 代林旺,李少林,秦世耀,等.含阻尼环节的电流源型风电虚拟同步发电机控制与分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(14):20-27.
DAI Linwang, LI Shaolin, QIN Shiyao, et al. Control and analysis of current-source wind turbine virtual synchronous generator with damping coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 20-27.
- [2] 王博,杨德友,蔡国伟.高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J].电网技术,2020,44(8):2998-3006.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia-related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3006.
- [3] 陈国平,李明节,许涛,等.关于新能源发展的技术瓶颈研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on the technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [4] 夏祥武,田梦瑶.风电并网一次调频控制性能研究[J].电气传动,2021,51(5):70-75.
XIA Xiangwu, TIAN Mengyao. Research on primary frequency

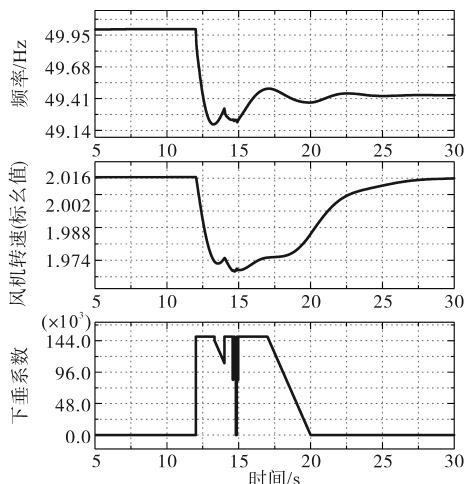


图9 根据所提判据进行下垂系数调整

Fig.9 Adjust the droop coefficient based on the proposed criteria

- modulation control performance of wind power grid-connected [J]. *Electric Drive*, 2021, 51(5): 70-75.
- [5] WU Y K, CHANG S M, MANDAL P. Grid-connected wind power plants: a survey on the integration requirements in modern grid codes[C]//2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 2019.
- [6] 万天虎, 李华, 徐浩, 等. 基于惯性和变桨协调的风电机组一次调频控制[J]. *电气传动*, 2018, 48(11): 53-57.
WAN Tianhu, LI Hua, XU Hao, et al. Wind turbine primary frequency regulation based on inertia and pitch coordination[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(11): 53-57.
- [7] 蔡玮良, 程海锋, 潘智轩, 等. 基于转子动能与分布式储能的双馈风机频率控制策略[J]. *电气传动*, 2023, 53(11): 9-18.
CAI Weiliang, CHENG Haifeng, PAN Zhixuan, et al. Frequency control strategy of DFIG based on rotor kinetic energy and distributed energy storage[J]. *Electric Drive*, 2023, 53(11): 9-18.
- [8] ZHAO C, SUN D, ZHANG X, et al. A two-stage power distribution scheme of multiple wind farms participating in primary frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(6): 5009-5021.
- [9] 刘柳, 王德林, 杨仁杰, 等. 基于桨距角控制的双馈风机参与电网二次调频控制策略研究[J]. *电工电能新技术*, 2020, 39(5): 10-16.
LIU Liu, WANG Delin, YANG Renjie, et al. Research on the control strategy of DFIG participating in secondary frequency regulation based on pitch control[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2020, 39(5): 10-16.
- [10] 边晓燕, 张青娴, 丁杨, 等. 基于 DFIG 虚拟惯量的微电网双维自适应动态频率优化控制[J]. *高电压技术*, 2020, 46(5): 1489-1498.
BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, DING Yang, et al. Double layer adaptive dynamic frequency optimization control of microgrid based on DFIG virtual inertia[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5): 1489-1498.
- [11] 江全元, 龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. *电网技术*, 2015, 39(12): 3360-3368.
JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong. Review of wind power integration control with energy storage technology[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(12): 3360-3368.
- [12] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(9): 2385-2391.
DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Integrated frequency control strategy of DFIGs based on virtual inertia and over-speed control[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(9): 2385-2391.
- [13] 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(2): 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(2): 225-232.
- [14] 颜湘武, 崔森, 常文斐. 考虑储能自适应调节的双馈感应发电机一次调频控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(5): 1027-1039.
YAN Xiangwu, CUI Sen, CHANG Wenfei. Primary frequency regulation control strategy of doubly-fed induction generator considering supercapacitor SOC feedback adaptive adjustment [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(5): 1027-1039.
- [15] 乔颖, 郭晓茜, 鲁宗相, 等. 考虑系统频率二次跌落的风电机组辅助调频参数确定方法[J]. *电网技术*, 2020, 44(3): 807-815.
QIAO Ying, GUO Xiaoqian, LU Zongxiang, et al. Parameter setting of auxiliary frequency regulation of wind turbines considering secondary frequency drop[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(3): 807-815.
- [16] 侍乔明, 王刚, 李海英, 等. 考虑调频能力的风电场虚拟惯量多机协同控制策略[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 4005-4015.
SHI Qiaoming, WANG Gang, LI Haiying, et al. Coordinated virtual inertia control strategy of multiple wind turbines in wind farms considering frequency regulation capability[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 4005-4015.
- [17] 劳焕景, 张黎, 赵彤, 等. 考虑分组控制和有序恢复的风电调频策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(16): 114-120.
LAO Huanjing, ZHANG Li, ZHAO Tong, et al. Frequency regulation strategy for wind power considering grouping control and orderly recovery[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(16): 114-120.
- [18] LU Z, YE Y, QIAO Y. An adaptive frequency regulation method with grid-friendly restoration for VSC-HVDC integrated offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 3582-3593.
- [19] WU Z, GAO D W, ZHANG H, et al. Coordinated control strategy of battery energy storage system and PMSG-WTG to enhance system frequency regulation capability[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(3): 1330-1343.
- [20] GARMROODI M, VERBIČ G, HILL D J. Frequency support from wind turbine generators with a time-variable droop characteristic[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(2): 676-684.
- [21] 赵晶晶, 李敏, 何欣芹, 等. 基于限转矩控制的风储联合调频控制策略[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(23): 4982-4990.
ZHAO Jingjing, LI Min, HE Xinqin, et al. Coordinated control strategy of wind power and energy storage in frequency regulation based on torque limit control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(23): 4982-4990.
- [22] 刘璋玮, 刘锋, 梅生伟, 等. 扩张状态观测器在双馈风机虚拟惯量控制转速恢复中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(5): 1207-1217.
LIU Zhangwei, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Application of extended state observer in wind turbines speed recovery after inertia response control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(5): 1207-1217.

(下转第78页)

度充电和深度放电。通过建立微电网运行调度模型,以最小运行成本作为目标函数,使用粒子群优化算法对算例进行模拟计算,根据计算结果绘制出微电网不同维度的曲线图,通过算例分析验证了所提策略的有效性。

参考文献

[1] 姚钢,王旭,周荔丹.基于模糊控制的光储微网实时电价能量管理策略[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(2):1-8.
YAO Gang, WANG Xu, ZHOU Lidan. Real-time electricity price energy management strategy for photovoltaic storage microgrid based on fuzzy control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(2): 1-8.

[2] 杨柳青,马群凯,刘晓军,等.含风光柴储的独立微电网容量优化配置研究[J].吉林电力,2020,48(2):19-23.
YANG Liuqing, MA Qunkai, LIU Xiaojun, et al. Optimal allocation of optical storage capacity of independent microgrid containing wind-solar-diesel-battery hybrid power generation[J]. Jilin Electric Power, 2020, 48(2): 19-23.

[3] 陈冰研.含多微网的主动配电网多时间尺度能量管理研究[D].保定:华北电力大学,2019.
CHEN Bingyan. Research on multi time scale energy management of active distribution network with multi-microgrids[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019.

[4] 方磊,牛玉刚,祖其武.微网可转移负荷调度与储能控制策略[J].华东理工大学学报(自然科学版),2018,44(4):588-594.
FANG Lei, NIU Yugang, ZU Qiwu. Transferable load dispatching and energy storage control strategy in microgrid[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 44(4): 588-594.

[5] 孔令志,唐西胜,齐智平,等.光柴储微网系统的储能动态能

量调度策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(20):6-12.
KONG Lingzhi, TANG Xisheng, QI Zhiping, et al. Study on dynamic senergy dispatch strategy of energy storage in PV-diesel-energy storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 6-12.

[6] 伍惠铨,王淳,左远龙,等.基于分时电价和蓄电池实时控制策略的家庭能量系统优化[J].电力系统保护与控制,2019,47(19):23-30.
WU Huicheng, WANG Chun, ZUO Yuanlong, et al. Home energy system optimization based on time-of-use price and real-time control strategy of battery[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 23-30.

[7] 柳溪.光伏微电网的发电和负荷预测方法及调度策略研究[D].武汉:华中科技大学,2018.
LIU Xi. Research on the method of power generation and load forecasting as well as scheduling strategy of photovoltaic micro grid [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

[8] 朱梅梅.基于光储柴的微网能量管理研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
ZHU Meimei. Research on energy management for microgrid based on solar/storage/diesel[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[9] 许琼果,张炜焘,刘光伟,等.计及储能调节特性的直流微电网优化调度研究[J].电气传动,2022,52(15):53-60.
XU Qiongguo, ZHANG Weitao, LIU Guangwei, et al. Research on optimal scheduling of DC microgrid considering energy storage regulation characteristics[J]. Electric Drive, 2022, 52(15): 53-60.

收稿日期:2023-01-13

修改稿日期:2024-02-02

(上接第70页)

[23] 秦世耀,代林旺,王瑞明,等.考虑风电机组功率跌落和机械载荷优化的虚拟惯量控制方法[J].电网技术,2021,45(5):1665-1672.
QIN Shiyao, DAI Linwang, WANG Ruiming, et al. Virtual inertia control method considering wind turbine power drop and mechanical load optimization[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1665-1672.

[24] YANG D, SANG S, ZHANG X. Two-phase short-term frequency response scheme of a DFIG-based wind farm[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 781989.

[25] 颜湘武,孙雪薇,崔森,等.考虑系统频率连续波动与二次跌落的双馈风力发电机组虚拟惯量通用控制策略[J].太阳能学报,2021,42(11):247-254.
YAN Xiangwu, SUN Xuewei, CUI Sen, et al. Virtual inertia general control strategy of DFIG-based wind turbine considering continuous fluctuation of system frequency and second frequency drop[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(11): 247-254.

[26] 张峰,田宇,丁磊.风电虚拟惯量延时的影响机理模型解析

及替代性研究[J].电力系统自动化,2024,48(7):267-276.
ZHANG Feng, TIAN Yu, DING Lei. Analytical solution for influential mechanism model of virtual inertia delay of wind power and its substitutability research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 267-276.

[27] 周海强,鲁锦文,薛峰,等.计及风电综合惯性控制的电力系统扩展频率响应模型[J].电力系统自动化,2023,47(8):198-205.
ZHOU Haiqiang, LU Jinwen, XUE Feng, et al. Extended frequency response model for power system considering wind power synthetic inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 198-205.

[28] 梁丹琦,汪震.考虑频率二次跌落抑制的风火联合一次调频控制[J].能源工程,2021(5):29-34,78.
LIANG Danqi, WANG Zhen. A wind-thermal combination- based primary frequency control scheme considering suppression of frequency second dip[J]. Energy Engineering, 2021(5): 29-34, 78.

收稿日期:2023-11-03

修改稿日期:2023-12-11