

[一次调频]

新能源对电力系统一次调频支撑能力仿真研究

文/王利锋¹ 秦伟²

1. 中国华电集团有限公司宁夏分公司；2. 中国电建集团湖北工程有限公司

光伏、太阳能等新能源场站的建设和并网发电规模逐年增大，这对于电力行业加快低碳能源具有重要的作用。当前新能源并网容量不断增大，但是对于新能源，尤其并网规模最大的光伏及太阳能资源对于电力系统一次调频潜在支撑能力的研究尚不完善。建立含大规模新能源的系统频率响应模型，研究新能源场站惯量支撑和一次调频能力，采用PSCAD/EMTDC搭建IEEE 39节点系统，分析比较风电、光伏不同控制模式下对电力系统一次调频能力。通过算例仿真分析可知，采用综合虚拟惯量控制方式下风电、光伏对于电力系统一次调频能力支撑能力最大，这对于优化电力系统一次调频调度策略具有重要的意义和实用价值。

随着经济的迅猛发展，人类对于化石、煤炭等传统能源的消耗量不断增加，传统能源的利用过程中，不可避免地产生了大量的碳排放^[1]。为解决能源危机和环境污染等问题，在“十四五”计划中表明，我国2030年前碳达峰、努力争取2060年前碳中和，构建以新能源为主体的新型电力系统^[2]。在新型电力系统的构建中，可再生能源的利用成为了能源转型的关键^[3]。可再生能源的间歇性和不确定性给电力系统的稳定运行带来诸多难题，尤其是在频率调节方面^[4]。电力系统频率的稳定是保证电网安全运行的基础，而一次调频作为频率调节的第一道防线至关重要^[5-8]。

传统的一次调频主要依靠常规火电机组的快速响应能力来实现。然而，随着风电、光伏和储能等新能源的大规模并网，电网的惯性和频率调节能力受到严重影响。因此，研究如何提升新能源场站的一次调频能力，以及如何优化电网的频率调节策略，成为当前电力系统研究的热点问题。文献[9]中针对高渗透率光伏并网混合火力发电系统中频率控

制方法，提出基于变论域模糊PID控制法，并验证此方法在频率调节上更加快速和稳定；文献[10]提出一种通过飞轮储能来辅助风电场进行一次调频的控制策略，并研究风储系统的频率特性，使风电场作为虚拟惯性控制参与系统一次调频；文献[11]中研究了考虑水风光互补的调频控制策略，考虑不同的水风光不同的新能源参与调频比例、限幅值的影响，仿真结果表明在此调频策略下多种新能源参与一次调频可改善电网在出现故障后的频率问题；文献[12]中针对风储协调过程中储能利用率低及风储功率不匹配的难题，提出一种改进风储联合一次调频控制策略，解决不同工况在切换时功率不匹配的问题，并通过仿真验证控制策略的有效性。

上述研究对于新能源并网时一次调频的控制策略研究提供参考，但是对于太阳能资源对电力系统一次调频潜在支撑能力的研究尚不完善。本文借助PSCAD/EMTDC仿真平台构建了IEEE 10机39节点系统，深入探究风电与光伏在不同控制模式下对电力系统一次调频能力的影响。通过算例仿真，分

析在综合虚拟惯量控制方式下风电、光伏对于电力系统一次调频能力的支撑能力。该研究于完善电力系统一次调频调度策略,提升系统调频效率和稳定性,具有显著的理论意义和实际应用价值。

一次调频能力要求分析

1. 一次调频技术分析

电力系统一次调频是指当电力系统频率相对额定频率发生偏移时,系统中发电机组为阻碍系统频率波动,自动增减有功功率进行调节的过程,为此需要留有一定的调频备用以满足调频需求。常规火电机组一次调频是靠汽轮发电机组本身的调节系统直接自动调整汽轮机调门完成电网负荷补偿,修正电网频率的波动。根据国家标准《火力发电机组一次调频试验导则》,机组参与一次调频的响应时间应小于3 s。火电机组在一次调频试验时容易出现负荷响应大于技术要求的3 s开始动作,有的甚至长达5~10 s开始响应调频指令。这类机组一次调频的性能对电网调频一般起不到正常的补偿作用,反而可能引起反向补偿。并且火电机组在一次调频时,如果入炉煤质较差,锅炉的动态调整过程势必增长,影响机组稳定,尤其对于直流锅炉表现更明显。

双馈异步风电机组是风电场最主要的装机机组,而此机组其机械功率与系统电磁功率解耦、转速与电网频率解耦,并且运行于最大功率点,导致其本身没有一次调频的能力,通过风电机组变桨控制来提高一次调频备用容量从而实现一次调频能力。为了充分利用太阳能资源,光伏场站一般采用最大功率点跟踪(MPPT)运行模式,因此光伏场站无一次调频备用容量,同时光伏发电本身为直流输出,通过逆变器将直流逆变为交流与电网连接,其出力与电网频率不存在耦合关系。

风电机组在限功率状态下发电会对机组的硬件系统和控制系统带来较大压力,风电机组外部加装储能装置,从而增加风电场一次调频备用容量。同时风电机组可以通过模拟同步发电机外特性,采用下垂控制方式,可以使新能源机组具有一次调频能力。虚拟同步机技术模拟同步发电机运行特性,实时追踪频率,与电网保持同步运行。

储能参与光伏场站一次调频主要以虚拟同步发电机为主,将整个光伏电站作为控制对象,储能系

统接入电站并网点,在储能系统上采用虚拟同步机控制方式,通过控制储能装置的输出进行调频、调压,将整个光伏电站作为虚拟同步机组。

2. 一次调频性能指标分析

DL/T1870—2018《电力系统网源协调技术规范》规定风电场、光伏发电站应具备一次调频功能,并且满足以下条件:

- 1) 一次调频死区:应控制在 ± 0.05 Hz内(该值可根据各区域电网实际情况确定)。
- 2) 一次调频调差率:建议值2%~3%(该值可根据各区域电网实际情况确定)。
- 3) 一次调频的最大负荷限幅:应不小于额定负荷10%,且不得因一次调频导致风电机组脱网或停机。
- 4) 对于调节目标变化量不低于额定出力10%的频率阶跃扰动,调频控制偏应控制在额定出力的 $\pm 1\%$ 以内。

新能源一次调频示意图如图1所示。

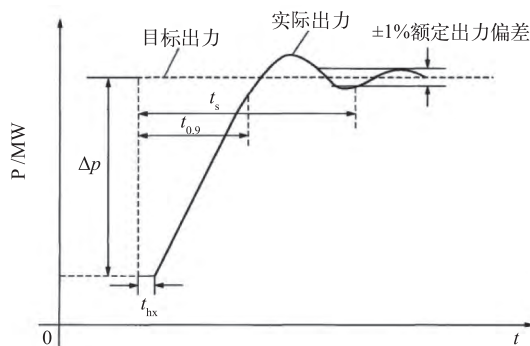


图1 新能源一次调频频率阶跃扰动过程调节示意图

设置储能参与系统一次调频评价指标。

1) 频率偏差的方均根值 f_{result} :

$$f_{\text{result}} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^n (f_i - f_0)^2} \quad (1)$$

式中, f_i 为第*i*个点的频率采样值; N_c 为采样点总个数; f_0 取电网额定频率50 Hz。

f_{result} 反映了系统频率离散程度,表示频率调整效果。电网频率与额定值偏差越小代表调频效果越好。

(2) 一次调频控制性能评价指标

$$C_p = \frac{\sum_{t=1}^T (\Delta P_{Gt} \times \Delta P_{St})}{\sum_{t=1}^T \Delta P_{St}^2} \quad (2)$$

式中, T 为评价时段; ΔP_{Gt} 与 ΔP_{St} 为该变量在*t*时刻的计算或采样值。

由于风电机组有自身一次调频备用容量，按频差紧急程度对储能系统一次调节责任进行修正。

为了体现机组跟随频差趋势的相关性，用相关系数 ρ 衡量各个相同时刻的 ΔP_G 与 ΔP_S 值构成两个随机变量的线性相关程度，即

$$C_p = \frac{\sum_{t=1}^T (\Delta P_{Gt} \times \Delta P_{St})}{\sum_{t=1}^T \Delta P_{St}^2} \quad (3)$$

为了让调节量能够达到预设的调节量，引入实际调节量标准差与标杆调节量标准差之比作为调节量是否达标的量度，记为调节量系数 γ 。最终一次调频指标为相关系数与调节量系数之积，并将其离散化后可得

$$\gamma = \frac{\sqrt{E\{\Delta P_G^2\}}}{\sqrt{E\{\Delta P_S^2\}}} \quad (4)$$

调节性能指标反映了电池实际调节量与理论调节量的大小关系以及相似程度，是对电池调节性能的综合体现。评价标准规定调节性能指标结果越接近1，则调节性能越好，见表1。

表1 调节性能指标 C_p 物理意义

$0 < C_p < 1$	调节不足
$C_p = 1$	正常调节
$C_p > 1$	调节过量
$C_p < 0$	反向调节
$C_p = 0$	无调节作用

(3) 投入情况评价标准

$$C = \frac{N_{p,Cq}}{N_{s,Cq}} \times 100\% \quad (5)$$

式中， $N_{p,Cq}$ 为评价时间段内投入情况指标 C_p 合格点数量； $N_{s,Cq}$ 为评价时间段内投入情况指标 C_q 总点数。

设定一次调频性能阈值，当 C_p 大于该阈值时，表明储能系统成功响应频率偏差；反之，当 C_p 小于该阈值时，未能成功响应频率偏差。可以利用电储能系统响应的成功与否来判断机组是否参与了一次调频。由于机组的一次调频存在响应延迟、调节速率有限等性能特性，故机组的一次调频响应不可能时刻准确跟踪，使自身的调节功率与标杆响应数量一致，因此，可以考虑采用频差历史数据中频差平均过零时长来作为计算 C_p 均值的时间长度。

判断每个时刻储能系统参与一次调频响应与否

标准为

$$C_{qt} = \begin{cases} 1 & C_{plt} > C_{ps} \\ 0 & C_{plt} \leq C_{ps} \end{cases} \quad (6)$$

在评价时段末统计该时段内所有 C_p 值为1的比例，该比例100%为合格。

新能源场站惯量支撑和一次调频能力分析

1. 新能源场站对电网频率响应特性的影响分析

得到的简化SFR模型可得系统动态频率响应特性，可以用以下系统功率平衡关系表示

$$\Delta P \times \frac{1}{2H_s + D} = \Delta f \quad (7)$$

式中， H 为系统总的惯性时间常数； D 为系统等效阻尼系数。

当大规模新能源机组代替常规机组接入电网，会降低整个电网的综合惯量，进而可能会对电网的频率安全稳定带来不利影响。假设风电、光伏等新能源场站以相同的容量代替电网中 m 台同步发电机组，则可定义新能源的渗透率水平为新能源实际出力占电网总发电量的比例，其表达式为

$$d_w = \frac{S_w}{S_w + S_s} \quad (8)$$

式中， d_w 为新能源的渗透率水平； S_w 为新能源的实际发电容量； S_s 为系统常规机组的发电容量。

新能源场站接入电网后系统等效惯性时间常数可表示为

$$H_s = (1 - d_w) H \quad (9)$$

式中， H_s 为考虑新能源接入后的系统等效惯性时间常数。

由此可见，若新能源不参与调频，随着新能源渗透率的不断提高，电网的等效惯性时间常数会逐渐减小，抗扰动能力也会逐渐降低。

2. 新能源场站的频率响应模型研究

随着新能源渗透率的不断提高，系统的等效静态频率特性系数也会逐渐增大，即系统的等效调差系数逐渐减小，系统在不平衡功率下的一次调频能力也会逐渐降低，因而进一步说明了高渗透率新能源的接入会对电网频率安全稳定带来较大的影响。根据上述分析的新能源接入后对系统频率响应模型参数的影响结果，则考虑新能源接入后不参与调频的系统频率响应模型如图2所示。

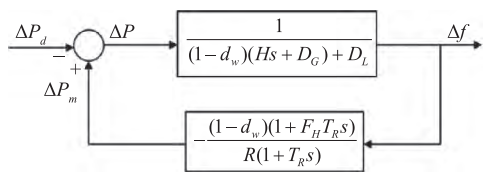


图2 新能源不参与调频的系统频率响应模型

根据系统频率响应模型，可以推导出考虑新能源接入后系统频率响应传递函数表达式为

$$\Delta f = \left[\frac{\omega_n^2}{(1-d_w)\left(D_G + \frac{1}{R}\right) + D_L} \right] \left[\frac{(1+T_R s)\Delta P}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \right] \quad (10)$$

式中， R 为等值同步发电机组的调差系数； T_R 为再热器时间常数； D_G 为发电机组等效阻尼系数； D_L 为负荷等效阻尼系数。

其中

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(1-d_w)(D_G R + 1) + D_L R}{2(1-d_w)HRT_R}} \quad (11)$$

$$\xi = \frac{2(1-d_w)HR + [(1-d_w)(D_G R + F_H) + D_L R]T_R}{2 \times (1-d_w)(D_G R + 1) + D_L R} \times \omega_n \quad (12)$$

当风电、光伏等新能源电源采用综合虚拟惯量控制方式，参与系统频率响应时，新能源接入除了影响系统等效惯性时间常数，系统一次调频能力以及等效阻尼系数外，新能源频率控制还会产生一个附加的频率响应功率参与频率调节。则考虑新能源频率控制后系统改进频率响应模型如图3所示。图3中， K_{df} 为新能源虚拟惯量控制参数； K_{pf} 为新能源下垂控制参数。

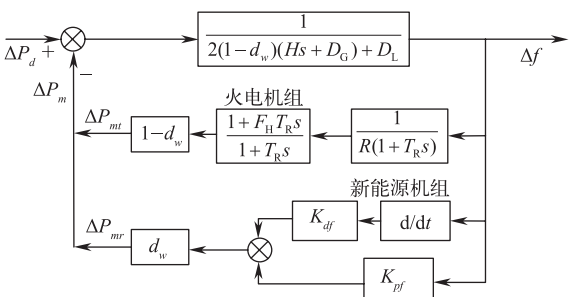


图3 含新能源频率控制的系统改进频率响应模型

新能源惯量和一次调频能力仿真分析

在PSCAD/EMTDC中搭建IEEE10机39节点系统，系统仿真模型如图4所示。

仿真系统中有10台发电机，分别为G1~G10。其中，G10为等值机组，容量为1 000 MW。母线39

（连接发电机G10）设为平衡节点，每台机组都采用经典次暂态模型。其他等值机组容量均为100 MW，惯性时间常数8 s。

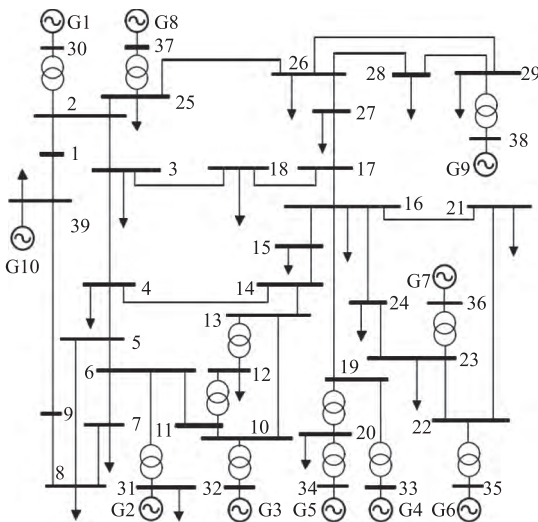


图4 IEEE 10机39节点仿真系统图

为了比较风电不同控制方式对调频效果的影响，将仿真系统中的G1、G3、G4、G5、G8火电机组替换为风电机组，总容量为900 MW，风电渗透率约为40%。比较了风电采用常规控制方式不参与调频以及采用虚拟惯量控制、下垂控制和综合虚拟惯量控制方式下风电有功功率曲线如图5所示，系统频率曲线如图6所示。

可以看出，风电虚拟惯量控制只能提供功率支撑，以抑制系统频率的初期下降，但是其功率支撑作用持续时间较短，对系统的频率后期恢复作用不大。风电参与下垂控制时，能够为系统提供长期的功率支撑，起到了模拟常规同步机组一次调频的作用。综合虚拟惯量控制结合虚拟惯量控制和下垂控制，对系统频率稳定性控制效果最好。

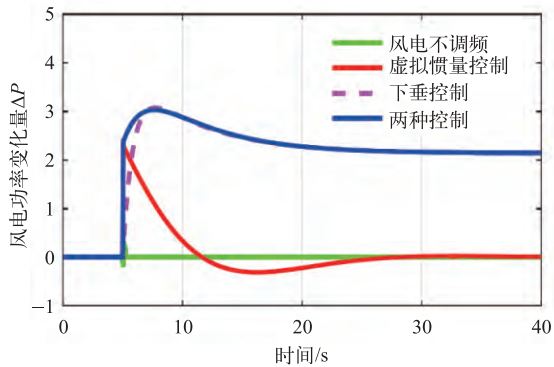


图5 不同控制方式下风电功率曲线

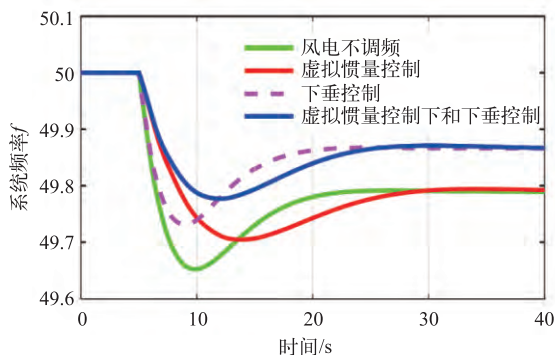


图6 不同控制方式下系统频率曲线

光伏采用常规控制方式不参与调频以及采用虚拟惯量控制，下垂控制，综合虚拟惯量控制方式对系统频率的控制效果和风电类似。

结束语

本文基于PSCAD/EMTDC仿真平台和IEEE 10机39节点系统模型，通过研究大规模新能源场站的惯量支撑能力和一次调频能力模型，解决光伏和太阳能资源等新能源技术对电力系统一次调频潜在支撑的调配问题。通过对风电和光伏不同控制模式下的调频效果进行分析，并提出一种综合虚拟惯量控制的方案，通过仿真算例验证该方案的有效性。结果表明，采用综合虚拟惯量控制方式，风电和光伏系统对电力系统一次调频的支撑能力最大，从而为电力系统的调频调度策略优化提供有效支持。在新能源逐步替代传统火电机组的背景下，为电力系统未来的调频调度方面提供重要的技术参考，在电网安全稳定运行领域提供新的思路。EA

(收稿日期：2025-01-15)

参考文献

[1] Wang Q, Guo J, Li R, et al. Is nuclear power a cost-effective energy transition option Comparative study on the impact of coal, oil, gas, renewable and nuclear power on economic growth and carbon

emissions[J]. Environ. Res, 2023, 221: 115290.

[2] 李雪寒. 电网友好型风电场参与系统一次调频策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.

[3] 杨望笑, 李倩. “双碳”目标背景下电力企业新能源经济发展策略分析[J]. 现代工业经济和信
息化, 2024, 14(10): 240-242.

[4] Ma M, Huang H, Song X, et al. Optimal sizing and operations of shared energy storage systems in distribution networks: A bi-level programming approach[J]. Applied Energy, 2022, 307: 118170.

[5] 赵泽宁. 火电机组的一次调频控制性能评价[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.

[6] 张小莲, 武启川, 郝思鹏, 等. 考虑功率匹配的风储联合一次调频控制策略[J]. 电气传动, 2025, 55(1): 81-89.

[7] 杨子健. 火力发电机组一次调频技术对比分析及改进建议[J]. 电力设备管理, 2024, (22): 125-127.

[8] 张玉莹, 李骥, 许雷, 等. 风储制氢电厂的一次调频控制策略[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2024, 29(1): 78-86.

[9] 艾永乐, 张鑫, 李星, 等. 高渗透率光伏混合发电系统的频率控制方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(3): 269-274.

[10] 金都, 刘广忱, 孙博文, 等. 计及风电场的飞轮储能一次调频控制策略[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1911-1920.

[11] 朱博, 吴水军, 黄柯昊, 等. 水风光互补系统一次调频方案研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 412-421.

[12] 张小莲, 武启川, 郝思鹏, 等. 考虑功率匹配的风储联合一次调频控制策略[J]. 电气传动, 2025, 55(1): 81-89.