

基于测试和运行数据的新能源快速调频参数动态修正算法

柯贤波¹, 程林¹, 牛拴保¹, 张振宇¹, 韩华玲², 贾一超^{2†}

(1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048;

2. 中国电力科学研究院有限公司(南京), 江苏 南京 210030)

摘要: 随着新能源发电接入电力系统比例的不不断提升, 电力系统对新能源发电参与系统一次调频提出了具体要求. 频率调差系数是评估新能源电站一次调频调节量的重要指标, 系统对于新能源电站的调差率是预设的. 然而系统发生频率波动时, 无法预知新能源电站的运行状态, 单一控制参数下新能源电站无法保证调频量满足系统需求. 鉴于此, 本文提出了基于调频量闭环控制的新能源电站一次调频控制参数动态修正方法, 根据新能源电站的运行状态, 动态调整其频率调差系数, 使得新能源电站运行在不同状态下均可以满足调频要求, 支撑系统频率稳定性.

关键词: 电力系统; 新能源发电; 一次调频; 参数修正

引用格式: 柯贤波, 程林, 牛拴保, 等. 基于测试和运行数据的新能源快速调频参数动态修正算法. 控制理论与应用, 2022, 39(3): 546 – 552

DOI: 10.7641/CTA.2021.10459

Study on parameters real-time revising of primary frequency modulation of renewable energy power station using test and operation data

KE Xian-bo¹, CHENG Lin¹, NIU Shuan-bao¹, ZHANG Zhen-yu¹,
HAN Hua-ling², JIA Yi-chao^{2†}

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an Shaanxi 710048, China;

2. China Electric Power Research Institute Nanjing Branch, Nanjing Jiangsu 210030, China)

Abstract: With the continuous increase of the proportion of renewable energy power generation connected to power system, the power system has put forward specific requirements for the primary frequency modulation of the renewable energy power generation system. The frequency droop coefficient is an important index for evaluating the amount of primary frequency adjustment of the renewable energy power generation station. The frequency droop coefficient of the system for the renewable energy power generation station is preset. However, when the frequency of power system fluctuates, it is impossible to predict the operation status of the renewable energy power generation station. Under a single control parameter, the renewable energy power generation station cannot guarantee that the frequency modulation amount can meet the system requirements. Therefore, a real-time correction method for the primary frequency modulation control parameters of the renewable energy power generation station is proposed, based on the closed-loop control of the frequency modulation. According to the operating state of the renewable energy power generation station, the frequency droop coefficient is adjusted in real time, so that the renewable energy power generation station can meet the frequency regulation requirements in different states and support system frequency stability.

Key words: power system; renewable energy generation; primary frequency modulation; parameter revising

Citation: KE Xianbo, CHENG Lin, NIU Shuanbao, et al. Study on parameters real-time revising of primary frequency modulation of renewable energy power station using test and operation data. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(3): 546 – 552

收稿日期: 2021-05-29; 录用日期: 2021-10-27.

†通信作者. E-mail: jiaichao0614@163.com; Tel.: +86 15652627900.

本文责任编辑: 张潮海.

国家电网有限公司科技项目(高占比新能源送端大电网风电场和光伏电站频率支撑能力协同控制和响应参数优化配置研究)资助.

Supported by the Science and Technology Project of SGCC(Research on Collaborative Control and Optimal Allocation of Response Parameters of Wind Farm and Photovoltaic Power Station in Power Grid with High Proportion of Renewable Energy).

1 引言

在我国西北和东北地区, 新能源装机和实际电量占比的提升, 将进一步挤占常规火电空间, 加之新能源的抗扰动性较差, 系统大幅频率扰动会增加新能源脱网风险, 新能源参与系统调频的需求日趋迫切^[1-2], 电力行业标准DL/T 1870-2018《电力系统网源协调技术规范》中对新能源参与电力系统一次调频要求提出了具体技术要求^[3].

新能源参与系统调频策略是近年的研究热点. 文献[4]调研整理了风电参与系统调频的技术框架, 包括机组、场站和系统层面的控制原理及特性, 指出后续需要加强“机-场-群”和“源-网”等层面的协调. 文献[5-6]分别从设备和场站的层面提出了具备变参数能力的风电调频控制策略; 文献[7]提出了适应电网频率变化的新能源发电调频控制策略; 文献[8]分析了调频控制增益对系统频率稳定的影响; 文献[9]分析了电网频率动态过程中多机不平衡功率输出响应特性, 并提出多机参与系统调频的不平衡功率分配及协调控制策略. 上述成果有益于提升新能源的调频性能. 2016年西北电网开展了风力发电和光伏发电的快速频率响应测试, 验证了新能源参与调频的技术可行性^[10-12]. 国家能源局西北监管局分别于2016年和2018年下发《国家能源局西北监管局关于推进西北电网新能源场站快速频率响应工作的通知》(西北能监市场[2016]43号)^[13]和《国家能源局西北监管局关于开展西北电网新能源场站快速频率响应功能推广应用工作的批复》(西北能监市场[2018]41号)^[14], 在西北全域推广新能源快速频率响应试点应用.

当新能源发电容量占比较高时, 有必要将新能源纳入系统调频体系, 电网制定运行方式和调控决策时需考虑新能源的调频性能. 对于常规机组的一次调频参数及其对电网的影响已有相对成熟的研究^[15]. 新能源电站的频率响应性能可以通过现场测试获取电站在标准测试工况下具备的理想快速频率响应能力; 控制增益则由电网实际需求根据系统频率控制的需求设定.

常规机组调频期间的功率是根据转速不等率^[15]进行分配的. 新能源电站的频率响应的执行单元是风电机组或光伏发电单元, 单体容量小且数量众多, 需考虑电站内部不同执行单元之间的分摊及协调问题. 实际运行时新能源发电设备运行状态多变, 天气条件变化^[16]等多种因素影响, 电站的实际调频能力会随之发生变化.

与常规机组相比, 新能源电站出力受天气、地理位置等因素影响, 不同地区新能源电站出力差异性大, 同一个新能源电站也可能出现不同发电单元出力不一致的情况. 此外, 由于新能源场站运行环境相对较差, 新能源发电单元启/停状态变化频率远高于常规机

组. 在上述运行条件下, 新能源场站有功出力受限, 然而系统对于新能源电站的调差率是预设的, 当系统发生频率波动时, 单一控制参数下新能源电站无法保证调频量满足系统需求. 对于电网调控运行来说, 准确掌握新能源电站的实际调频能力有利于更加合理的制定和修正运行方式和调控决策, 这就需要在实际运行时对新能源电站调频参数进行修正并及时反馈修正结果.

本文以新能源发电作为主要研究对象, 提出一种测试和运行数据相结合的新能源电站一次调频参数修正方法, 利用历史数据校验新能源电站实际调频能力作为修正电站调频参数的依据, 进而利用实时运行数据和超短期预测功率对新能源电站一次调频参数进行修正. 采用西北电网实际数据验证所提方法对于优化系统调频的作用.

2 问题的提出

2.1 新能源电站参与一次调频的方式

新能源电站参与系统一次调频的方式有两种: 一种是由新能源机组直接响应系统频率变化并提供功率支撑; 另一种是新能源自动发电控制(automation generation control, AGC)响应系统频率变化整定功率调节量并分配给新能源机组执行. 上述两种实现方式的技术可行性在2016年上半年西北电力系统频率特性试验中均得到验证.

2.1.1 新能源电站参与一次调频的方式

新能源机组调频方式示意图见图1. 新能源机组实时检测系统频率 f , 计算频率偏差 Δf , 若 Δf 超出调频控制死区, 按预先设定的调频控制增益确定有功功率调节量 ΔP , 将其叠加到当前有功参考值 P_{ref} 得到有功功率控制目标 P_{ref}^* , 再由新能源机组实现控制.

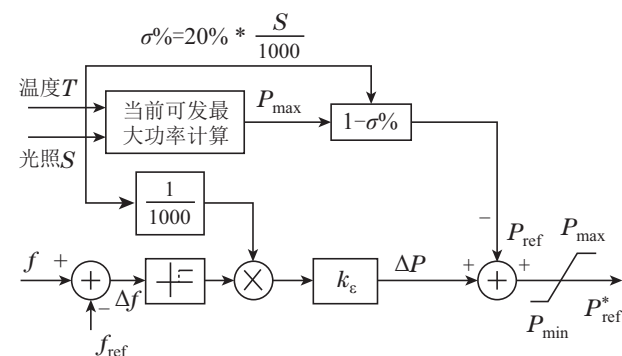


图1 新能源机组调频控制

Fig. 1 Frequency regulation by renewable energy power unit

图中: S 为标准条件下的太阳辐照度, T 为环境温度, σ 为调频备用系数, P_{ref} 为频率参考值, P_{max} 和 P_{min} 分别为新能源机组可输出的最大和最小有功功率.

2.1.2 新能源电站一次调频性能参数的影响因素

新能源场站级调频控制架构如图2所示, 电站一次

调频性能受以下因素影响:

1) 可用发电功率, 与风速/太阳辐照度和机组的运行数量相关, 直接决定了新能源电站的调频容量, 为使新能源电站具备上调能力, 可令新能源发电单元/新能源电站在可用发电功率基础上按一定比例降功率运行. 可用发电功率越大, 则新能源电站的调频容量越大, 反之亦然.

2) 调频控制增益, 决定了新能源发电单元/新能源电站在系统频率变化时实际提供的调频容量, 也会影响新能源电站的调频性能.

3) 机组调节性能, 决定了新能源机组响应频率变化和执行业调频指令的性能.

4) 新能源电站AGC控制性能, 决定了场站调频方式下频率指令下发周期.

上述因素中, 机组调节性能和新能源电站AGC控制性能均可以通过现场测试准确掌握, 且在软硬件不发生变化的情况下通常不会发生改变; 影响可用发电功率的太阳辐照度由资源确定. 故只有调频控制增益会由于机组运行状态的差异和变化, 与设定值发生偏差.

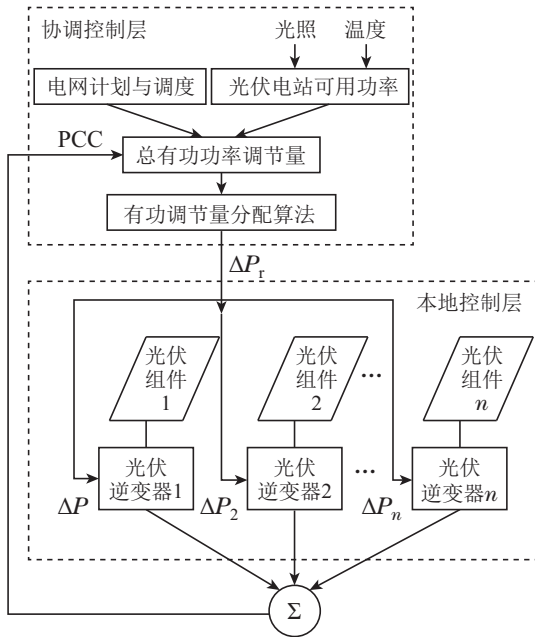


图2 场站级调频控制架构

Fig. 2 Structure of frequency regulation for renewable energy generation station

2.1.3 解决思路

电网运行方式和调控策略均为在已知边界条件下针对某一特定时间区间的预决策, 实际运行时会根据边界条件和各元件运行状态的变化做滚动调整和修正. 故新能源电站一次调频参数的确定也需与电网运行体系相适应, 其思路如图3所示.

AGC根据新能源电站的短期功率预测和新能源电站调频测试性能整定全网调频容量及调频系数, 并分

配下发给参与调频的新能源电站. 新能源电站接收到相关指令后, 根据具体的调频方式和测试性能参数确定电站内各机组的初始分摊系数, 并以此为当前控制周期的控制依据. 实际运行时, 新能源电站一次调频参数修正与电网动态调度的时间周期相匹配, 每个调度周期根据超短期预测功率的变化和机组动态运行状态修正一次调频参数作为下一个控制周期的控制依据.

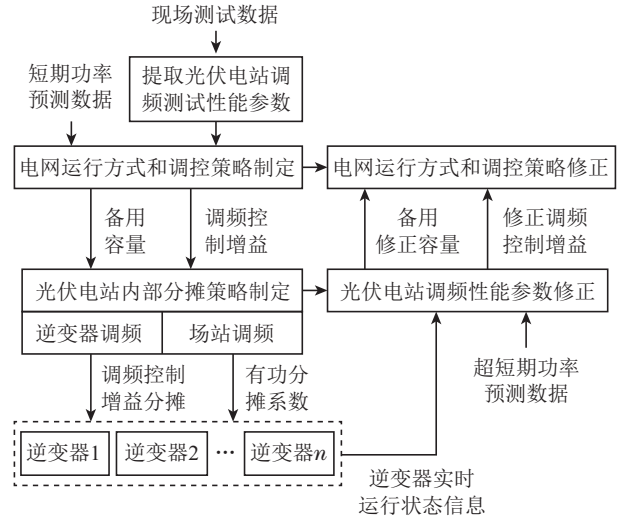


图3 一次调频参数修正框架

Fig. 3 Parameter revising for primary frequency regulation

3 新能源电站一次调频初始参数

新能源电站频率响应测试通过在控制系统出口施加频率扰动信号, 观测并记录新能源电站整体频率响应数据, 利用测试数据分析得到上升时间 t_u 、峰值时间 t_p 和调节时间 t_s 等关键性能指标.

结合近年试点运行的经验, 目前普遍通过场站级功率控制系统来实现一次调频^[8], 后续主要针对该控制方式进行讨论. 按照自动控制原理^[17]的定义, 可以提取如图4所示的新能源机组和场站控制系统的控制参数(需说明的是, 新能源电站的具体调频策略并非完全一致, 本文仅以图4为例对方法进行说明).

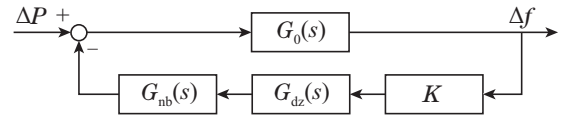


图4 新能源电站一次调频控制等效框图

Fig. 4 Equivalent block of primary frequency for renewable energy power generation

图4中, $G_0(s)$ 为系统的频率响应传递函数, $G_{dz}(s)$ 和 $G_{nb}(s)$ 分别为电站层和机组层的传递函数. 采用文献[7]的定义,

$$G_0(s) = \frac{1}{2Hs + 1}, \quad (1)$$

$$G_{dz}(s) = \frac{1}{T_1s + 1}, \quad (2)$$

$$G_{nb}(s) = \frac{1}{T_2 s + 1}, \quad (3)$$

其中: H 为电网惯性时间常数, D 为阻尼系数, T_1 为电站控制系统下发指令时间, T_2 为机组执行时间. 由图4得到新能源电站调频控制模型的闭环特征方程为

$$1 + K G_0(s) G_{dz}(s) G_{nb}(s) = 0. \quad (4)$$

由于新能源电站频率响应测试通过在控制系统出口施加频率扰动信号并由新能源电站进行响应实现闭环, 故在利用测试数据进行一次调频初始参数识别时图4中的 $G_0(s)$ 实际就是一个一阶惯性环节, 可表示为

$$G_0(s) = \frac{1}{T_0 s + 1}. \quad (5)$$

进而可得到

$$T_0 T_1 s^2 + (T_0 + T_1)s + (1 + K) = 0, \quad (6)$$

设 $T_0 T_1 = a$, $T_0 + T_1 = b$, 则式(4)可写为

$$a s^2 + b s + (1 + K) = 0. \quad (7)$$

根据测试数据分析得到的新能源电站调频性能指标, 可以得到调频控制的增益 K 、阻尼振荡频率 ω_d 和自然频率 ω_n , 则有如下关系:

$$\begin{cases} \frac{1 + K}{a} = \omega_n^2, \\ \frac{b}{2a} = \omega_n \cdot \zeta. \end{cases} \quad (8)$$

新能源电站接收到AGC下发的调频备用系数 R 和调频控制增益 K 后通常会制定分摊策略并向新能源机组下发指令. 设新能源机组的初始调频性能和运行状态一致, 若新能源电站内的机组数量为 N , 则每台机组的初始分摊控制增益 K_i 为

$$K_i = \frac{K}{N}. \quad (9)$$

4 新能源电站一次调频修正参数

实际运行时, 新能源机组的运行状态多变会引起功率不平衡^[9], 需考虑机组在运行数量、可用发电功率和实际调节性能方面的差异对新能源电站一次调频的分摊系数进行修正. 在考虑新能源电站一次调频参数修正时, 进一步将图4细化为图5.

由图4得到新能源电站调频控制模型的闭环特征方程为

$$1 + G_0(s) G_{dz}(s) \cdot [K_1 G_{nb1}(s) + K_2 G_{nb2}(s) + \dots + K_n G_{nb n}(s)] = 0. \quad (10)$$

如果考虑各机组的执行时间没有差异, 则式(10)可改写为

$$1 + [K_1 + K_2 + \dots + K_n] G_0(s) G_{dz}(s) G_{nb}(s) = 0. \quad (11)$$

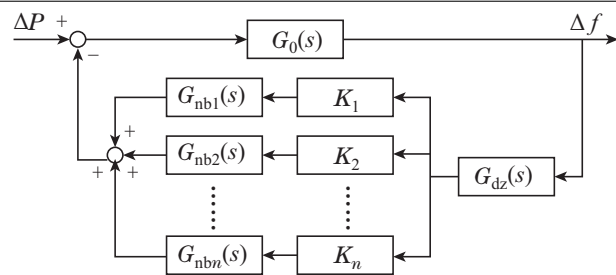


图5 新能源电站一次调频分摊示意

Fig. 5 Allocation of primary frequency for renewable energy power generation

为了使新能源电站的一次调频性能与初始给定一致, 对比式(4)和式(11)可知需保持各机组分摊控制增益之和与 K 相等. 由于各机组出力状态的差异, 机组控制增益分摊时还需考虑各机组的可调容量. 可调容量大的机组分摊控制增益大; 可调容量小的机组分摊控制增益小.

设分摊参数修正时在运行机组台数为 n , 每台机组的可调节容量 ΔP_i , 则修正后每台机组的控制增益 K_i 为

$$K_i = K \cdot \frac{\Delta P_i}{\sum_{i=1}^n \Delta P_i}. \quad (12)$$

若所有机组的可调节容量之和无法满足系统要求, 则修正新能源电站的控制增益, 并将修正后的调频性能参数反馈给AGC. 修正后的控制增益 K' 为

$$K' = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i / P_N}{\Delta f / f_{ref}}, \quad (13)$$

式中 P_N 为电站额定装机容量.

将控制增益 K' 替换式(5)的 K , 可以计算得到修正后的新能源电站一次调频上升时间 t_u 、峰值时间 t_p 和调节时间 t_s 等关键性能指标.

5 算例分析

5.1 算例概述

以西北某地区含高比例新能源的局部电网为基础并做适当简化, 进行算例设计. 该局部电网中总装机容量3690 MW, 其中, 风电装机容量1100 MW, 光伏装机容量900 MW, 水电装机容量480 MW, 火电装机容量1220 MW. 一次调频备用容量369 MW, 具体配置如表1所示.

基于上述算例系统, 进行对比分析, 包括两部分: 参数修正对新能源电站调频特性的影响分析和参数修正对电网频率特性的影响分析. 分析参数修正对新能源电站调频特性的影响时, 分别选取设置新能源电站的调频目标, 通过改变不同时刻新能源机组状态来验证新能源电站调频参数修正的效果; 分析参数修正对电网频率特性的影响时, 通过设置故障产生频率扰

动,验证新能源电站调频参数优化对电网频率特性的影响.

表1 一次调频备用初始容量

Table 1 Initial reserve capacity for primary frequency modulation

电源名称	机组数量	备用容量/MW
风电场	11个电站	1100
光伏电站	6个电站	900
水电机组	4台机组	480
火电机组	13台机组	1220

5.2 参数修正对新能源电站调频特性的影响

以光伏发电站为例,说明参数修正对新能源电站调频特性的影响.

选取某装机容量为20 MW的光伏电站,由10台单机容量为2.15 MW的逆变器组成,设初始时段所有逆变器均正常运行,不同时段每台光伏逆变器的可调节容量均为0.5 MW.采用文献[11]给出的光伏电站实测分析结果,经分析可知该光伏电站的上升时间 t_u 、峰值时间 t_p 和调节时间 t_s 等关键性能指标,如表2所示.

表2 光伏电站频率响应的测试性能指标

Table 2 Performance indices of primary frequency response for PV plant by testing

指标名称	数值
调节容量	5.0 MW
上升时间 t_u	2.0 s
峰值时间 t_p	3.0 s
调节时间 t_s	16.0 s

按式(8)计算得到光伏电站频率响应的控制增益为28.4,设各台逆变器的初始调频性能参数、可调节容量和运行状态均一致,则每台逆变器的控制增益为2.84.

若不对调频增益进行修正,时段2和时段3的光伏电站的控制增益分别为22.7和17,对应的频率响应性能指标如表3所示.可见由于控制增益减小,上升时间和峰值时间增加.

表3 未经修正的光伏电站频率响应性能指标

Table 3 Performance indices of primary frequency response for PV plant without revising

指标名称	时段2	时段3
调节容量	4.0 MW	3.0 MW
上升时间 t_u	2.1 s	2.4 s
峰值时间 t_p	3.6 s	4.2 s
调节时间 t_s	16.0 s	16.0 s

按第4节方法计算,修正得到时段2和时段3的各台逆变器的调频控制增益如表4所示.

表4 修正后的光伏电站频率响应性能指标

Table 4 Performance indices of primary frequency response for PV plant by revising

指标名称	时段2	时段3
调节容量	4.0 MW	3.0 MW
上升时间 t_u	2.0 s	2.0 s
峰值时间 t_p	3.0 s	3.0 s
调节时间 t_s	16.0 s	16.0 s

修正调频增益后,光伏电站在时段2和时段3的控制性能指标如表4所示,控制性能与时段1保持一致,仅调节容量受限.

对比分析可见,修正前后光伏电站的频率响应性能存在显著差异,动态修正一次调频参数有利于系统更加稳定运行.

表5 修正后的光伏电站频率响应性能指标

Table 5 Revised primary frequency control gain of inverters

光伏逆变器	时段1	时段2	时段3
1	2.84	3.55	4.73
2	2.84	3.55	4.73
3	2.84	3.55	4.73
4	2.84	3.55	4.73
5	2.84	3.55	4.73
6	2.84	3.55	4.73
7	2.84	3.55	
8	2.84	3.55	
9	2.84		
10	2.84		

5.3 参数修正对电网频率特性的影响

设置系统故障产生功率冗余2630 MW,使电网频率抬升,并按前述方法对新能源电站调频参数进行动态修正,对比修正前后系统频率特性差异.

仿真过程中,设新能源电站初始有功功率均为0.8(p.u.),均有20%的新能源逆变器在进行检修.某光伏电站的有功曲线如图6所示,系统频率响应曲线如图7所示.

由图6可知,当系统发生频率扰动时,经调频参数修正,新能源电站具有更好的调节性能,能够快速向系统提供有功支撑.

由图7可知,对新能源电站一次调频参数进行动态修正可以有效改善系新能源电站的频率响应特性和系统频率特性.新能源电站调频参数修正前后,系统最大频率偏移分别达到51.5 Hz和51.2 Hz,参数修正

后最大频率偏移下降0.3 Hz; 系统频率稳定得到提升, 参数修正后, 系统频率约22 s即恢复稳定。

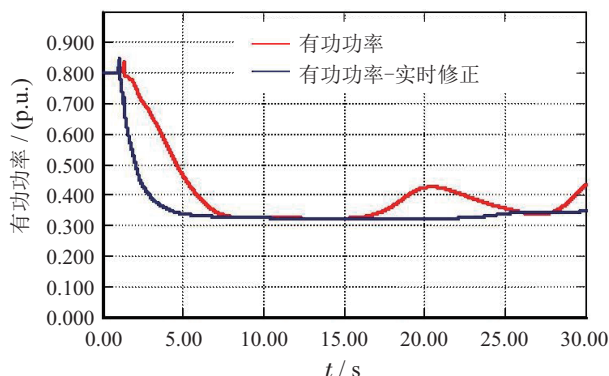


图6 光伏电站一次调频响应对比

Fig. 6 Comparison of primary frequency response for PV plant

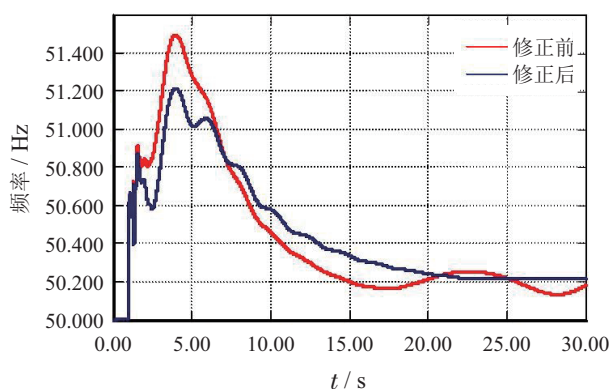


图7 系统频率响应曲线对比

Fig. 7 Comparison of system frequency response

6 结语

随着新能源发电并网渗透率的不断提升, 电网调频电源在不断被压缩, 进而需要新能源发电等新能源发电参与系统调频。然而与常规调频机组不同, 新能源电站包含数十上百个并网单元, 不同的运行工况特性差异较大, 很难实现单一控制参数满足系统一次调频需求, 因此需要结合新能源电站的运行状态动态修正一次调频控制参数。本文提出了基于一次调频控制的闭环控制的调频量分摊系数动态修正方法, 可有效避免由于新能源电站运行特性差异造成的调频量缺失, 从而可以有效支撑系统频率控制。

参考文献:

- [1] ZHENG Chao, WANG Shiyuan, ZHANG Boqi, et al. Dynamic frequency characteristics and countermeasures of power grid with highly penetrated photovoltaics. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 4064 – 4073.
(郑超, 王士元, 张波琦, 等. 新能源高渗透电网动态频率特性及应对措施. 电网技术, 2019, 43(11): 4064 – 4073.)
- [2] LU Zongxiang, YE Yida, GUO Li, et al. Frequency regulation challenge of power electronics dominated power system and its new multi-level coordinated control framework. *Electric Power*, 2018, 62(4): 8 – 18.
(鲁宗相, 叶一达, 郭莉, 等. 电力电子化电力系统的调频挑战与多层级协调控制框架. 中国电力, 2018, 62(4): 8 – 18.)
- [3] LI Mingjie, YU Zhao, HE Fengjun, et al. *Technical Code for Power System Network Source Coordination*. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
(李明节, 于钊, 何凤军, 等. 电力系统网源协调技术规范. 北京: 中国电力出版社, 2018.)
- [4] ZHANG Xu, CHEN Yunlong, YUE Shuai, et al. Retrospect and prospect of research on frequency regulation technology of power system by wind power. *Power System Technology*, 2018, 42(6): 1793 – 1803.
(张旭, 陈云龙, 岳帅, 等. 风电参与电力系统调频技术研究的回顾与展望. 电网技术, 2018, 42(6): 1793 – 1803.)
- [5] FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(27): 4706 – 4716.
(付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706 – 4716.)
- [6] WU Y, YANG W, HU Y, et al. Frequency regulation at a wind farm using time-varying inertia and droop controls. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2019, 55(1): 213 – 224.
- [7] ZHONG Cheng, ZHOU Shunkang, YAN Gangui, et al. A new frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve level control. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5): 1013 – 1024.
(钟诚, 周顺康, 严干贵, 等. 基于变减载率的新能源发电参与电网调频控制策略. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1013 – 1024.)
- [8] ZHAO Dawei, MA Jin, QIAN Minhui, et al. Research on control gain for photovoltaic power plants participating in primary frequency regulation of large power grid. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 425 – 433.
(赵大伟, 马进, 钱敏慧, 等. 新能源电站参与大电网一次调频的控制增益研究. 电网技术, 2019, 43(2): 425 – 433.)
- [9] JIA Qi, YAN Gangui, ZHANG Shanfeng, et al. Dynamic coordination mechanism of grid frequency regulation with multiple photovoltaic generation units. *Automation of Electric Power System*, 2019, 43(24): 59 – 66.
(贾祺, 严干贵, 张善峰, 等. 多新能源发电参与电网频率调节的动态协调机理. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 59 – 66.)
- [10] SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Lin, et al. Parameter setting of rapid frequency response of renewable energy sources in Northwest Power Grid based on coordinated control of multi-frequency regulation resources. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1760 – 1765.
(孙晓强, 刘鑫, 程林, 等. 基于多调频资源协调控制的西北送端大电网新能源快速频率响应参数设置方案. 电网技术, 2019, 43(5): 1760 – 1765.)
- [11] SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Song, et al. Actual measurement and analysis of fast frequency response capability of PV-inverters in Northwest Power Grid. *Power System Technology*, 2017, 41(9): 2792 – 2798.
(孙晓强, 刘鑫, 程松, 等. 新能源逆变器参与西北送端大电网快速频率响应能力实测分析. 电网技术, 2017, 41(9): 2792 – 2798.)
- [12] SUN Xiaoqiang, CHENG Song, LIU Xin, et al. Test method for frequency characteristics of Northwest sending-end Power Grid. *Automation of Electric Power System*, 2018, 42(2): 148 – 153.
(孙晓强, 程松, 刘鑫, 等. 西北送端大电网频率特性试验方法. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 148 – 153.)

- [13] Northwest regulatory bureau of national energy administration: Notice of northwest regulatory bureau of national energy administration on promoting rapid frequency response of new energy stations of Northwest Power Grid(northwest energy regulatory market [2016] No. 43). 2016.
(国家能源局西北监管局. 国家能源局西北监管局关于推进西北电网新能源场站快速频率响应工作的通知(西北能监市场[2016]43号). 2016.)
- [14] Northwest regulatory bureau of the national energy administration: Reply of northwest regulatory bureau of the national energy administration on promoting the application of fast frequency response function of new energy stations of Northwest Power Grid(northwest energy regulatory market [2018] No. 41). 2018.
(国家能源局西北监管局. 国家能源局西北监管局关于开展西北电网新能源场站快速频率响应功能推广应用工作的批复(西北监能市场[2018]41号). 2018.)
- [15] JIN Na, LIU Wenyong, CAO Yinli, et al. Influence on grid frequency characteristic by the parameters of primary frequency modulation of large capacity generator units. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(1): 91 – 95.
(金娜, 刘文颖, 曹银利, 等. 大容量机组一次调频参数对电网频率特性的影响. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 91 – 95.)
- [16] WANG Chengliang, ZHU Lingzhi, DANG Dongsheng, et al. Impacts on photovoltaic power characteristics and power system frequency regulation with cloud cluster movement. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(11): 1626 – 1631.
(王诚良, 朱凌志, 党东升, 等. 云团移动对新能源电站出力特性及系统调频的影响. 可再生能源, 2017, 35(11): 1626 – 1631.)
- [17] WU Qi, WANG Shifu. *Principles of Automatic Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
(吴麒, 王诗宓. 自动控制原理. 北京: 清华大学出版社, 2006.)

作者简介:

柯贤波 硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统仿真分析, E-mail: kexianbo@126.com;

程林 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析, E-mail: chengl@nw.sgcc.com.cn;

牛拴保 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析, E-mail: niusb@nw.sgcc.com.cn;

张振宇 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析, E-mail: zhangzy@nw.sgcc.com.cn;

韩华玲 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电并网仿真分析与控制, E-mail: hanhualingok@163.com;

贾一超 硕士, 工程师, 研究方向为新能源并网仿真分析, E-mail: jiayichao0614@163.com.