

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191452

# 调频关键参数对电网频率特性的影响及其灵敏度分析

王凡<sup>1</sup>, 李海峰<sup>2</sup>, 胥国毅<sup>1</sup>, 金涛<sup>2</sup>, 刘方蕾<sup>1</sup>, 闫家铭<sup>1</sup>, 毕天姝<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 为应对高比例新能源接入给系统频率稳定性带来的不利影响, 除开发新能源参与调频的控制策略外, 还需提高系统自身的调频能力。系统调频关键参数决定了系统的调频能力, 分析调频关键参数对系统频率响应指标的影响是选择调频关键参数、提升电网频率响应的关键。在频率响应模型的基础上, 理论分析了包括惯性时间常数、调频死区、调差系数等频率控制关键参数对系统频率特性的影响。并对上述参数进行了灵敏度分析, 确定了不同参数对频率响应指标的影响程度。利用电力系统分析综合程序(PSASP)建立36节点系统模型对理论分析结果进行了仿真验证, 为调频关键参数选取提供了参考。基于研究结果对新能源参与系统调频的定位进行了分析。

**关键词:** 惯性时间常数; 死区; 调差系数; 频率特性; 灵敏度分析

## Influence of key parameters of frequency control on frequency characteristics of power grid and sensitivity analysis

WANG Fan<sup>1</sup>, LI Haifeng<sup>2</sup>, XU Guoyi<sup>1</sup>, JIN Tao<sup>2</sup>, LIU Fanglei<sup>1</sup>, YAN Jiaming<sup>1</sup>, BI Tianshu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** High penetration of renewable power brings challenges to frequency stability. To solve this problem, one solution is to develop frequency control strategies for the renewable generation. It is also necessary to improve the frequency control capability of the system. The key parameters of frequency control determine the frequency control capability of the system, and the analysis of their influence on frequency response is the key to selecting proper parameters and improving the frequency response of the power grid. Based on the system frequency response model, the influence of key parameters of frequency control including inertia time constant, frequency control dead band and adjustment coefficient on frequency response characteristics is theoretically analyzed. The sensitivity of the key parameters is analyzed, and the influential level of the parameters on the indices of the frequency response is obtained. The Power System Analysis Software Package (PSASP) is used to verify the results with a 36-node system. The results can be helpful for the selection of frequency control parameters. Based on the results, the role of the renewable energies participating in frequency control is analyzed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51725702), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2019MS008) and Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (No. SGJS0000DKJS1900761) "Research on Frequency Stability Control of Receiving-end Power Grid including High-Penetration Renewables".

**Key words:** inertial time constant; dead band; adjustment coefficient; frequency characteristics; sensitivity analysis

## 0 引言

电网频率本质上反映了电力系统中发电和负荷

的平衡度, 是电力系统运行质量和安全的重要指标之一<sup>[1-2]</sup>。电力系统通常通过惯量响应、一次调频与二次调频等控制手段维持系统频率稳定<sup>[3]</sup>。随着新能源占比不断提高, 压缩了同步发电机的并网容量, 系统有效惯量降低, 给电网的安全稳定运行尤其是频率稳定带来挑战<sup>[4]</sup>。

为应对新能源接入带来的系统频率稳定性问题, 除了挖掘新能源参与调频的控制方法之外, 对

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51725702); 中央高校基本科研业务费项目资助(2019MS008); 国网江苏省电力有限公司科技项目资助(SGJS0000DKJS1900761)“含高比例新能源的受端电网频率稳定控制研究”

系统的调频能力也有了更高的要求。调频关键参数的选择是否合理,直接影响系统的调频能力。因此,深入研究关键参数对电网频率动态特性的影响,能够为选择合理的参数提供参考依据,对提高系统调频能力,保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。

与系统调频相关的关键参数包括:系统惯性时间常数,一次调频死区和调差系数等。惯性时间常数反映系统惯量,是与系统频率响应特性密切相关的参数。惯量响应能够快速响应系统频率变化,新能源接入取代部分常规机组,使整个系统的惯性时间常数发生明显变化<sup>[5-7]</sup>,对频率稳定性造成较大影响。一次调频死区、调差系数作为与系统频率响应密切相关的参数,其数值和分布对电网的频率响应特性以及频率稳定性具有重要的影响<sup>[8]</sup>。设置死区能够避免机组频繁动作,提高机组稳定性,新能源的波动性和随机性使系统频率变化增大,容易频繁触发一次调频。调差系数反映了系统在发生功率扰动时能够提供的有功支撑,新能源一般运行在最大功率跟踪状态,无备用功率,新能源替代常规机组后,等效调差系数增大,给系统频率带来不利影响。

目前调频关键参数的研究主要以频率响应模型为基础,文献[9]提出了频率响应(System Frequency Response, SFR)模型,对系统频率响应特性进行了理论分析,分析了关键参数对于系统频率响应的影响,但并未讨论关键参数对频率响应指标的影响程度。文献[10]基于聚合后的 SFR 模型进行频率响应分析,用于指导风-火-需求侧响应协调的频率控制方法。文献[11]对单机带集中负荷模型的动态频率响应模型进行扩展,提出结合低频减载的 SFR 模型。

现有的死区与频率特性的关系研究中,大都通过仿真得出结论,缺少理论分析。电网实际运行以及大量仿真都表明调频死区设置的大小关系着一次调频的响应速度以及出力,对系统频率稳定性的影响不容忽视,调频死区逐渐受到关注。文献[12]从发电机组一次调频机理出发,分析了调差系数和死区参数设置与电网频率稳定性和调频能力的关联关系。文献[13]利用单机等值系统研究了不同的死区设置方式对系统频率振荡行为的影响。文献[14]考虑调频死区对频率动态过程的影响,提出了考虑死区的一次调频能力评估指标,使评估结果更加准确。

灵敏度分析是电力系统中重要的分析方法,通过灵敏度分析能够快捷有效地确定对输出影响较大的因素,依据灵敏度对参数进行调整,可以有效地提高电网的安全性<sup>[15]</sup>。文献[16]推导了电力系统稳定器(PSS)参数灵敏度指标的计算过程,提出了通过灵敏度分析对低频振荡阻尼进行约束优化的方法。

文献[17]推导了配电网状态估计中状态量对量测量、权重系数以及线路参数的灵敏度,从而得出不确定性因素对状态估计结果的影响。文献[18]将灵敏度分析方法用于低频振荡的影响分析,验证了光伏电站的接入位置、接入容量对区间低频振荡模式的影响。因此,分析各参数的灵敏度,可以在实际应用中根据系统特性选择相对灵敏的参数调节,使参数的设置更具有针对性,对参数的选择和优化具有指导意义,有利于提高电网的调频能力和新能源接纳能力。

本文在解析方法的基础上考虑了调频死区的影响,从理论上分析了调频关键参数对系统频率特性的影响,研究了调频关键参数对频率动态响应指标的灵敏度,并以 EPRI-36 节点系统为算例验证了结论的正确性,为调频关键参数的选取提供了参考。基于以上分析,对含高比例新能源的电力系统中新能源参与系统调频的定位进行了分析。

## 1 调频关键参数分析

### 1.1 惯性时间常数

惯性时间常数反映系统惯量,是系统的固有参数,与系统频率响应特性密切相关。当频率发生变化时,电网内各发电机的转子速度基本同步变化,运行中的旋转部分中储存的动能被释放,用于抑制转子转速的变化,因此系统总惯量对频率动态过程有直接影响<sup>[19]</sup>。对一个具有多台发电机组的系统来说系统等值惯性时间常数的计算公式如式(1)所示。

$$H_{\text{sys}} = \frac{H_1 S_{B1} + H_2 S_{B2} + L + H_n S_{Bn}}{S_N} \quad (1)$$

式中:  $S_N$  为系统额定容量;  $S_{Bn}$  为各机组额定容量;  $H_n$  为各机组惯性时间常数;  $H_{\text{sys}}$  为系统等值惯性时间常数。

对于新能源机组,由于其对电网呈现的弱惯性甚至无惯性特性,因此认为其惯性时间常数为 0。随着新能源发电的快速发展,电力系统的常规发电机组被新能源机组大量替代,电力系统的等效转动惯量不断降低,系统频率稳定水平持续下降,造成电网频率特性恶化<sup>[20-21]</sup>。

### 1.2 一次调频死区

常规火电机组通过调速器调节进气门开度,提升发电机输入机械功率、增加发电功率,实现有功频率的下垂控制,以减小系统频率稳态偏差。

设置死区的目的是在系统中发生小扰动情况下,利用死区过滤较小的频率波动,提高机组的稳定性,避免机组频繁动作。另外,死区的设置必须在一定范围内,死区设置过大或过小都不利于机组

的安全稳定运行。死区设置过小或不设死区会导致微小频率波动, 引起调速器动作, 阀门频繁调节, 磨损设备, 缩短机组使用寿命; 死区设置过大, 会导致较大频率偏差下调速器仍不动作, 影响系统一次调频性能。对于同步机组的死区, 一般规定: 火电机组一次调频死区不大于 $\pm 2 \text{ r/min}$ ( $\pm 0.033 \text{ Hz}$ )。常见的死区特性示意图如图 1 所示。

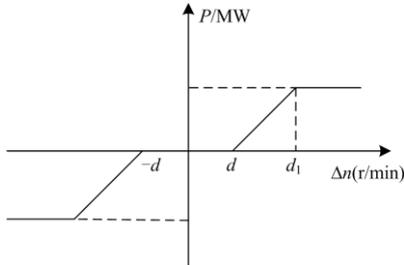


图 1 调频死区特性示意图

Fig. 1 Dead zone characteristic of frequency modulation

### 1.3 调差系数

调差系数可定量表明某台机组负荷改变时相应的转速(频率)偏移, 标志随着频率的升降发电机组发出功率减少或增加的多寡, 能直接体现出当频率发生扰动时, 机组对有功的支撑能力<sup>[22]</sup>。调差系数与机组单位调节功率互为倒数。其定义为

$$R = -\frac{\Delta f / f_N}{\Delta P / P_{GN}} \times 100\% = \frac{f_0 - f_N}{P_{GN}} \quad (2)$$

多台机组并列运行时, 要求各发电机调速器具有功率-频率静态特性, 以保证功率在各机组间的分配比例。系统中, 单台机组的调节方程为

$$\Delta P_G = -\frac{1}{R} \times \frac{\Delta f}{f_N} P_{GN} \quad (3)$$

考虑系统频率变化相同, 因此将每台机组的调节方程求和, 得到  $M$  台同步发电机的调节方程为

$$\Delta P_\Sigma = -\frac{\Delta f}{f_N} \sum_{i=1}^M \frac{P_{GN}}{R_i} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以看出, 机组的调差系数越小, 可提供的功率就越多, 一次调频能力越强。但调差系数不应当过小, 对于相同的频率偏移量, 调差系数过小时, 机组的调节器会频繁动作, 机组出力稳定性下降。因此需要合理设置调差系数。《电力系统网源协调技术规范》中规定同步发电机组中火电机组的调差系数范围为: 4%~5%。

## 2 调频关键参数对频率响应特性影响分析

### 2.1 调频关键参数研究的数学模型

为分析关键参数对于系统频率动态过程的影响, 需要建立数学模型进行理论分析, 图 2 为分析

系统频率响应的数学模型<sup>[8]</sup>。

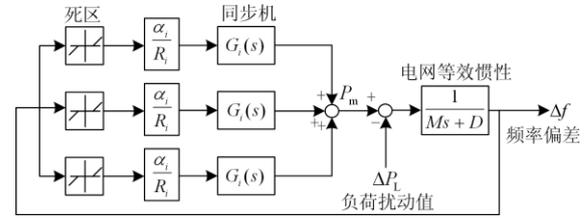


图 2 系统频率响应数学模型

Fig. 2 Mathematical model of the system frequency response

图中:  $\alpha_i$  为电网中第  $i$  台机组装机容量占系统总装机容量的比例;  $R_i$  为电网中第  $i$  台机组的调差系数;  $G_i(s)$  为第  $i$  台发电机原动机(忽略调速器延时)的传递函数;  $\Delta P_L$  为电网功率扰动的标幺值;  $\Delta f$  为电网频率变化的标幺值;  $D$  为系统的阻尼常数;  $M$  为系统的惯性时间常数, 将电网中机组的惯性时间常数加权聚合即可得到系统等值惯性时间常数<sup>[23-24]</sup>。

结合图 1、图 2, 可以推导出多台发电机并列运行时的系统频率响应的解析表达式。式(5)为小扰动下不触发一次调频时的频率偏差公式; 式(6)为大扰动下触发一次调频时的频率偏差公式。

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L(s)}{Ms + D} \quad \Delta f \leq d \quad (5)$$

$$\Delta f = -\frac{\sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{R_i} \cdot G_i(s) \cdot d + \Delta P_L(s)}{Ms + D + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{R_i} \cdot G_i(s)} \quad \Delta f > d \quad (6)$$

对于电网中参加一次调频的机组, 可以根据汽轮机的本体结构分为再热机组和非再热机组两大类。为便于分析, 本文采用考虑死区的频率响应模型进行研究, 下面仅以再热式汽轮机为例进行分析, 主要考虑死区动作( $\Delta f > d$ )时的频率响应, 其数学模型如图 3 所示, 参数确定需要将整个网络的发电机模型等值聚合。

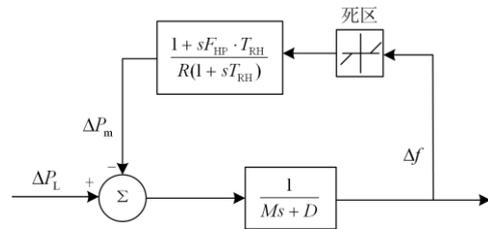


图 3 考虑死区的 SFR 模型

Fig. 3 SFR model considering dead zone

### 2.2 频率动态过程解析表达式

系统频率稳定性可以通过稳态频率偏差 $\Delta f_0$ 、最大频率偏差 $\Delta f_{\max}$ 、频率变化率 $d\Delta f / dt$ 和到达频率最低点的时间 $T_{\text{nadir}}$ 等指标来衡量, 各指标如图 4 所示。

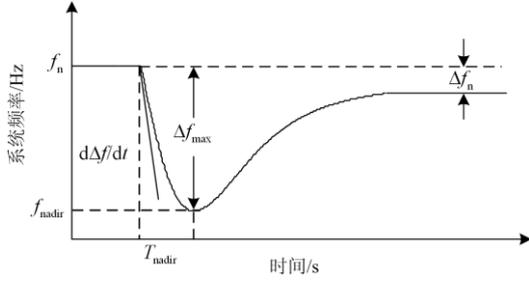


图4 电力系统典型频率下降曲线

Fig. 4 Typical frequency drop curve of power system

本文采用以上四个指标表征系统的频率响应特性,通过求取各指标的解析表达,进而分析各关键参数对于频率响应指标的灵敏度。

根据图3可知,发生功率为 $\Delta P_L$ 的扰动后,系统方程可表示为

$$\Delta P_L - (\Delta f - d) \cdot \frac{1 + sF_{HP} \cdot T_{RH}}{R(1 + sT_{RH})} = (Ms + D)\Delta f \quad (7)$$

进而可以得到系统的频率响应为

$$\Delta f(s) = \frac{[(dF_{HP}T_{RH} + T_{RH}\Delta P_L R)s + (d + \Delta P_L R)]\omega_n^2}{1 + DR} \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (8)$$

式中,  $\omega_n^2 = (1 + D_{eq}R)/(RM_{eq}T_{RH})$  为自然频率,  $\xi = (RM + F_{HP} \cdot T_{RH} + T_{RH}DR)/2\sqrt{RMT_{RH}(1 + DR)}$  为阻尼比。

当  $t \rightarrow \infty$  时,可获得系统的稳态频率偏差为

$$\Delta f_n = \lim_{s \rightarrow 0} \Delta f = \frac{d + \Delta P_L R}{1 + DR} \quad (9)$$

系统最大频率变化率在时域中表示为  $s\Delta f$ ,且出现在初始时刻,即  $s \rightarrow \infty$ ,频率偏差未达到死区,认为  $d=0$ ,因此系统的最大频率变化率为

$$\left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{\max} = \frac{\Delta P_L}{M} \quad (10)$$

考虑到扰动为阶跃扰动  $\Delta P_L(t) = \Delta P_L u(t)$ ,  $\Delta P_L$  为扰动幅值,  $u(t)$  为阶跃函数,将其进行拉普拉斯变换后得到  $\Delta P_L(s) = \Delta P_L/s$ ,代入式(8),得到

$$\Delta f(s) = \frac{d(1 + sF_{HP} \cdot T_{RH}) + \frac{\Delta P_L}{s} R(1 + sT_{RH})}{1 + DR} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (11)$$

将式(11)转变为时域,得到频率响应的时域表达式为

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta P_L R}{1 + DR} + K \cdot e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_s t + \varphi_3) \quad (12)$$

式中:

$$\omega_s = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2};$$

$$K = \sqrt{(B^2 + A_3^2 - 2BA_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_2))/(1 - \xi^2)},$$

$$B = \sqrt{A_1^2 \omega_n^2 + A_2^2 - 2A_1 A_2 \omega_n \xi},$$

$$A_1 = (d + \Delta P_L R T_{RH})/(1 + DR),$$

$$A_2 = dF_{HP}/RM, A_3 = \Delta P_L R/(1 + DR),$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right), \varphi_2 = \tan^{-1} \left( \frac{A_2 \sqrt{1 - \xi^2}}{A_1 \omega_n - A_2 \xi} \right);$$

$$\varphi_3 = \tan^{-1} \left( \frac{B \sin \varphi_2 - A_3 \sin \varphi_1}{B \cos \varphi_2 - A_3 \cos \varphi_1} \right)$$

当  $t = T_{nadir}$  时,系统频率偏差出现最大值,此时系统频率变化率为0。

$$\frac{d\Delta f(t)}{dt} = K \omega_n \cdot e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_s t + \phi) = 0$$

即  $\sin(\omega_s t + \phi) = 0$  时,存在频率最低点,频率最低点时间为

$$T_{nadir} = -\phi / \omega_s \quad (13)$$

式中,  $\phi = \varphi_3 + \tan^{-1}(\sqrt{1 - \xi^2}/(-\xi))$

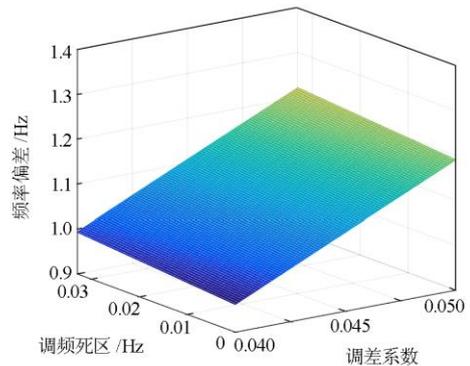
因此,将式(13)代入式(12)的时域表达式中,求得系统最大频率偏差为

$$\Delta f_{\max} = \frac{\Delta P_L R}{1 + DR} + K \cdot e^{-\xi\omega_n T_{nadir}} \sin(\omega_s T_{nadir} + \varphi_3) \quad (14)$$

### 2.3 调频关键参数影响分析

根据2.2节的分析,可以得到关键参数对于频率响应指标的解析关系,并在此基础上分析关键参数对电网频率特性的影响。研究某一关键参数对频率响应动态过程的影响时,为获得更明显的频率偏差,  $\Delta P_L$  可取较大值,比如  $\Delta P_L = 0.5$ ,其他参数设为典型值<sup>[3]</sup>:表征发电机固有特性的参数  $F_{HP} = 0.3$ ,  $T_{RH} = 10$  s,调频关键参数  $M = 10$ ,  $d = 0.033$  Hz,  $R = 0.05$ ,负荷阻尼系数  $D = 1$ 。

由式(9)可知,稳态频率偏差是关于死区和调差系数的函数,二者对于  $\Delta f_n$  的影响如图5所示,可以看出发生功率扰动后,系统的稳态频率偏差受到死区和调差系数的共同影响,呈正相关性,随死区和

图5 关键参数对于 $\Delta f_n$ 的影响Fig. 5 Influence of key parameters on  $\Delta f_n$

调差系数的增大, 稳态频率偏差增大。

由式(13)和式(14)可知, 频率到达最低点的时间  $T_{\text{nadir}}$  和最大频率偏差  $\Delta f_{\text{max}}$  同时受到惯性时间常数、死区、调差系数的影响, 分别以三个关键参数为变量, 绘制出它们与  $T_{\text{nadir}}$  和  $\Delta f_{\text{max}}$  的函数关系, 如图 6 和图 7 所示。

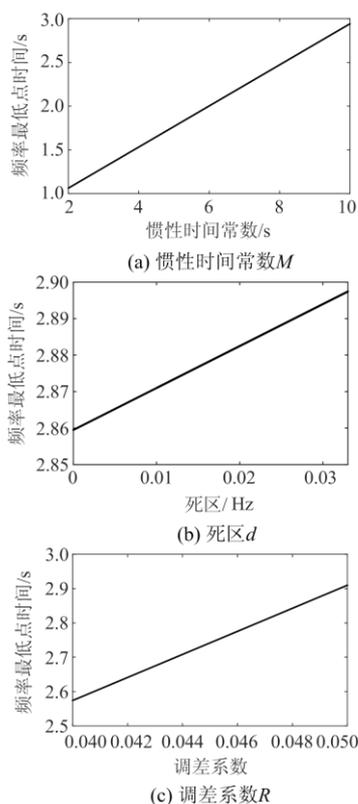


图 6 关键参数对于  $T_{\text{nadir}}$  的影响

Fig. 6 Influence of key parameters on  $T_{\text{nadir}}$

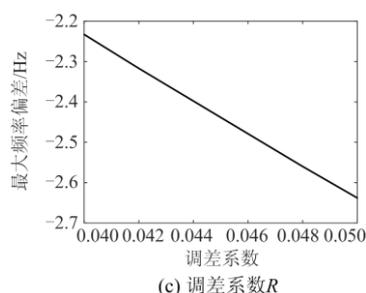
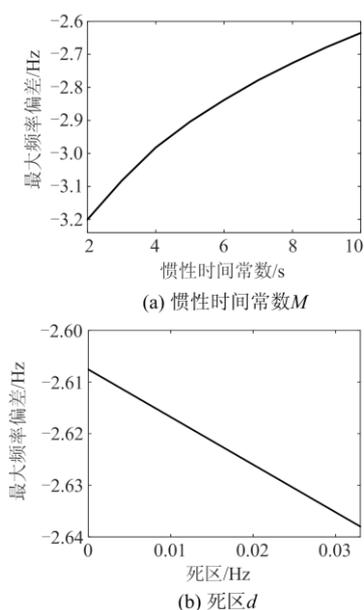


图 7 关键参数对  $\Delta f_{\text{max}}$  的影响

Fig. 7 Influence of key parameters on  $\Delta f_{\text{max}}$

由图 6 可以看出, 频率最低点时间和最大频率偏差由惯性时间常数、死区、调差系数共同决定, 随关键参数的增大而增大; 由图 7 可以看出, 最大频率偏差与惯性时间常数呈负相关, 随惯性时间常数的增大而减小, 与死区和调差系数呈正相关, 随二者的增大而增大; 由式(10)可知, 最大频率变化率仅受惯性时间常数的影响, 惯性时间常数越大, 最大频率变化率越小, 与死区和调差系数无关。

现有的频率响应模型大都未考虑死区的影响, 无法为研究调频死区对电网频率特性的影响提供理论支撑, 本文提出的考虑死区的电网频率响应分析方法, 推导了包含死区的解析表达式, 能够较为全面地表征关键参数对频率响应动态过程的影响。

需要注意的是, 本文以再热式发电机组对系统频率的影响进行了分析, 对于其他类型发电机组, 其与频率相关的有功控制环节与再热式机组结构基本相同。此外, 基于系统频率统一的假设, 本文采用的系统频率响应模型包含了系统主要的有功控制环节, 能够反映系统的频率响应特性, 因此本文的分析结果也同样适用于含多种发电类型的复杂系统。

### 3 关键参数对于频率响应指标灵敏度分析

为了进一步分析不同参数的变化对频率响应指标的影响程度的定量结果, 本章采用关键参数灵敏度的概念, 由于在参数可调范围内, 各频率响应指标变化近似呈线性, 因此本文将关键参数灵敏度 (Key Parameters Sensitivity, KPS) 定义为电网调频关键参数对某频率响应指标的灵敏度, 以该关键参数在典型值基础上变化 10% 后, 该指标变化百分比的绝对值表示。

按上述定义, 使用典型值计算各指标, 将典型值变化 10% 后再次计算该指标, 求得 KPS。计算过程中, 再热式同步机组的固有特性参数取  $F_{\text{HP}}=0.3$ ,  $T_{\text{RH}}=10$  s, 调频关键参数的初始值取  $M=10$  s,  $d=0.033$  Hz,  $R=0.05$ , 负荷阻尼系数取  $D=1$ <sup>[3]</sup>。为

了获得较为明显的频率响应,  $\Delta P_L=0.5$ 。分别分析惯性时间常数、死区、调差系数对 $\Delta f_n$ 、 $d\Delta f/dt$ 、 $T_{nadir}$ 、 $\Delta f_{max}$ 的灵敏度, 结果如表 1 所示。

本文根据关键参数灵敏度的定义, 求得各参数对不同频率指标的灵敏度, 由表 1—表 4 的结果可以得出以下结论: 对于最大频率变化率和频率到达最低点的时间, 惯性时间常数的 KPS 最大, 因此惯性时间常数的变化对上述两个指标更敏感; 对于稳态频率偏差和最大频率偏差, 调差系数的 KPS 最大, 因此调差系数的变化对上述两个指标更敏感。

表 1 关键参数对 $\Delta f_n$ 的灵敏度分析

参数	典型值下 $\Delta f_n$	参数变化 10%后 $\Delta f_n$	KPS
惯性时间常数 $M$	-1.221 9	-1.221 9	0.000%
死区 $d$	-1.221 9	-1.218 8	0.257%
调差系数 $R$	-1.221 9	-1.108 1	9.311%

表 2 关键参数对  $d\Delta f/dt$  的灵敏度分析

参数	典型值下 $d\Delta f/dt$	参数变化 10%后 $d\Delta f/dt$	KPS
惯性时间常数 $M$	0.05	0.055 6	11.20%
死区 $d$	0.05	0.05	0.00%
调差系数 $R$	0.05	0.05	0.00%

表 3 关键参数对  $T_{nadir}$  的灵敏度分析

参数	典型值下 $T_{nadir}$	参数变化 10%后 $T_{nadir}$	KPS
惯性时间常数 $M$	2.885	2.628	8.908%
死区 $d$	2.885	2.882	0.104%
调差系数 $R$	2.885	2.760	4.332%

表 4 关键参数对 $\Delta f_{max}$ 的灵敏度分析

参数	典型值下 $\Delta f_{max}$	参数变化 10%后 $\Delta f_{max}$	KPS
惯性时间常数 $M$	-2.636 0	-2.681 0	1.707%
死区 $d$	-2.636 0	-2.630	0.228%
调差系数 $R$	-2.636 0	-2.436 0	7.587%

## 4 仿真验证

为验证关键参数对系统频率特性的影响及其灵敏度, 本文在电力系统分析综合程序(PSASP)中, 采用 EPRI-36 模型<sup>[25]</sup>为算例进行仿真, 系统接线图如图 8 所示。

该模型包含 8 台发电机, 36 个节点, 设置 G2 发电机在第 5 s 失去 20% 发电功率, 分析不同参数对于频率动态过程的影响。依次改变系统内机组的惯性时间常数、死区、调差系数, 系统的频率特性

如图 9 所示。

由图 9(a)可以看出, 惯性时间常数越大, 表明系统惯量越大, 对转速变化的抑制能力越强, 在扰动发生时, 系统频率变化率和最大频率偏差越小,

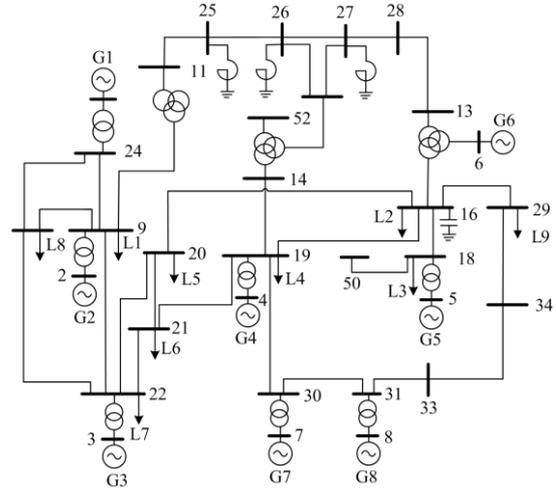
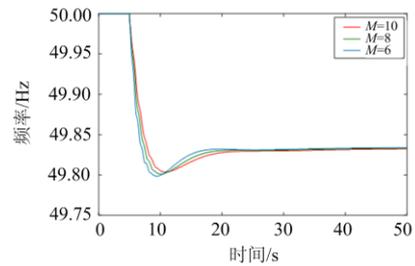
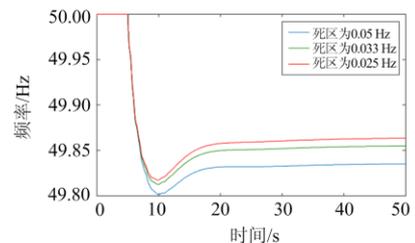


图 8 EPRI-36 系统接线图

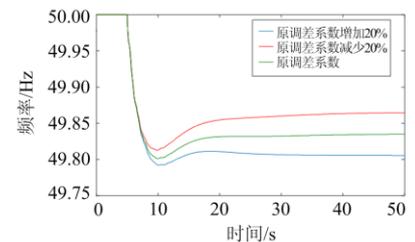
Fig. 8 Diagram of EPRI-36 system



(a) 不同惯性时间常数下的频率特性曲线



(b) 不同死区下的频率特性曲线



(c) 不同调差系数下的频率特性曲线

图 9 关键参数对频率特性曲线的影响

Fig. 9 Influence of key parameters on frequency characteristic curve

频率下降到最低点所需的时间越长, 但最终稳态频率值不受影响; 由图 9(b)可以看出, 当系统的扰动一定时, 死区越小, 频率动态过程中最大频率偏差减小, 频率到达最低点的时刻略有减小, 稳态频率偏差相应增加, 并且在故障发生初始, 频率变化率没有区别; 由图 9(c)可以看出, 当系统的扰动一定时, 调差系数越小, 动态过程中最大频率偏差减小, 频率到达最低点的时刻减小, 稳态频率偏差相应增加, 并且在故障发生初始, 频率变化率没有区别。

从关键参数对频率响应指标的灵敏度来看, 惯性时间常数的变化对最大频率变化率和频率到达最低点的时间更敏感, 调差系数的变化对稳态频率偏差和最大频率偏差更敏感, 因此仿真结果验证了上文的结论。

## 5 结论

为提高新能源接纳能力, 需要提高系统自身的调频能力以保障含高比例新能源系统的频率稳定性。本文在系统频率响应模型的基础上, 考虑了调频死区的影响, 推导出包含调频死区的系统频率响应表达式, 更全面地分析了调频关键参数对电网频率特性的影响。

本文定义了关键参数灵敏度指标, 并分析了各参数对于频率响应指标的敏感度, 结论如下: (1) 惯性时间常数对最大频率变化率和频率到达最低点的时间敏感度较高; (2) 死区的主要作用是防止调速器频繁动作, 其变化对频率响应指标的灵敏度较低; (3) 调差系数对稳态频率偏差和最大频率变化率的敏感度较高。通过仿真对以上结论进行了验证, 本文提出的解析方法和灵敏度分析方法能够正确表征参数对频率动态过程的影响及程度。在实际参数选择中, 根据系统频率特性, 可优先考虑对敏感参数进行整定, 达到更好的调频效果。

基于灵敏度分析结果可知, 惯性时间常数对频率变化率更为敏感, 随着新能源渗透率的提高, 降低了系统惯性时间常数, 系统频率变化率增大, 以频率变化率为依据的保护动作风险增加。利用新能源的快速功率调节能力提供系统惯量支撑不影响机组的正常运行, 能够改善系统的频率变化率, 同时保证新能源场站效益, 是新能源参与系统调频的理想方式。同步发电机组一次调频更能有效地降低系统最大频率偏差, 更适合在一次调频阶段为系统提供持续的有功功率支撑。

## 参考文献

[1] 王一振, 马世英, 王青, 等. 大型火电机组动态频率响

应特性[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 106-111.

- WANG Yizhen, MA Shiying, WANG Qing, et al. Dynamic frequency response characteristics of large thermal power generation units[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 106-111.
- [2] TAYLOR C W, NASSIEF F R, CRESAP R L. Northwest power pool transient stability and load shedding controls for generation-load imbalance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PER-1(7): 3486-3495.
- [3] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2005: 271-274.
- [4] 胥国毅, 胡家欣, 郭树锋, 等. 超速风电机组的改进频率控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 39-44.
- XU Guoyi, HU Jiaxin, GUO Shufeng, et al. Improved frequency control strategy for over-speed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(28): 39-44.
- [5] 肖固城, 唐飞, 廖清芬, 等. 一种可改善失步振荡模式的风电虚拟惯性控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 61-70.
- XIAO Gucheng, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. A virtual inertia control strategy of wind power to improve the out-of-step oscillation modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 61-70.
- [6] 赵振元, 陈维荣, 戴朝华, 等. 系统惯性时间常数对互联电网暂态稳定水平的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 102-107.
- ZHAO Zhenyuan, CHEN Weirong, DAI Zhaohua, et al. Influence of system inertia time constants on transient stability level of interconnected AC power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 102-107.
- [7] NGUYEN H T, YANG G, NIELSEN A H, et al. Combination of synchronous condenser and synthetic inertia for frequency stability enhancement in low-inertia systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 997-1005.
- [8] 于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 72-76.
- YU Daren, GUO Yufeng. The online estimate of primary frequency control ability in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 72-76.
- [9] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [10] 杨森, 杜文娟, 王旭斌, 等. 风火-需求侧响应协调频率控制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 845-853.
- YANG Sen, DU Wenjuan, WANG Xubin, et al. Coordinated frequency control method of wind/thermal/demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 845-853.
- [11] DENIS L. A general-order system frequency response model incorporating load shedding: analytic modeling

- and applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 709-717.
- [12] 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[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 91-95.  
JIN Na, LIU Wenying, CAO Yinli, et al. Effect of primary frequency modulation parameters on the frequency characteristics of the large capacity generators[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 91-95.
- [13] 陈磊, 张林, 闵勇, 等. 单机等值系统调速器死区对频率振荡的影响[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 107-112, 128.  
CHEN Lei, ZHANG Lin, MIN Yong, et al. Influence of dead band of governor on frequency oscillation in single machine equivalent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 107-112, 128.
- [14] 贺颖, 潘杨, 陶骞, 等. 考虑调频死区的电网一次调频能力评价指标[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 85-90.  
HE Ying, PAN Yang, TAO Qian, et al. Evaluation index of power grid primary frequency modulation considering dead zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 85-90.
- [15] BENIDRIS M, MITRA J. Reliability and sensitivity analysis of composite power systems considering voltage and reactive power constraints[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1245-1253.
- [16] 史慧杰, 陈陈, 陈迅, 等. 基于灵敏度分析的电力系统稳定器参数优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 15-19.  
SHI Huijie, CHEN Chen, CHEN Xun, et al. Power system stabilizer parameters optimization based on sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 15-19.
- [17] KUHAR U, PANTOŠ M, KOSEC G, et al. The impact of model and measurement uncertainties on a state estimation in three-phase distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3301-3310.
- [18] 葛景, 都洪基, 赵大伟, 等. 光伏电站接入对多机电力系统低频振荡的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 63-70.  
GE Jing, DU Hongji, ZHAO Dawei, et al. Influences of grid-connected photovoltaic power plants on low frequency oscillation of multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 63-70.
- [19] TIELENS P, HERTEM D V. The relevance of inertia in power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 999-1009.
- [20] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.  
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [21] MAGDY G, SHABIB G, ELBASET A A, et al. Optimized coordinated control of LFC and SMES to enhance frequency stability of a real multi-source power system considering high renewable energy penetration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 407-421. DOI: 10.1186/s41601-018-0112-2.
- [22] 江海洋, 李倩, 李天琦, 等. 基于改进皮尔逊积矩相关系数的一次调频关键参数校核辨识方法[J]. 机电工程技术, 2019, 48(7): 180-184.  
JIANG Haiyang, LI Qian, LI Tianqi, et al. Identification of key parameters of primary frequency modulation based on improved Pearson product moment correlation coefficient[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(7): 180-184.
- [23] 李世春, 曹润杰, 雷小林, 等. 基于改进 SFR 模型的含风电虚拟惯性/一次调频电力系统频率响应特性[J]. 可再生能源, 2019, 37(5): 694-700.  
LI Shichun, CAO Runjie, LEI Xiaolin, et al. Frequency characteristics of power system involving virtual inertia and primary frequency regulation of wind power based on modified SFR model[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(5): 694-700.
- [24] AKBARI M, MADANI S M. Analytical evaluation of control strategies for participation of doubly fed induction generator-based wind farms in power system short-term frequency regulation[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(3): 324-333.
- [25] 电力系统分析综合程序暂态稳定 ST6.1 用户手册[R]. 北京: 电力科学研究院, 1999.  
Integrated power system analysis program transient stability ST6.1 user manual[R]. Beijing: Electric Power Research Institute, 1999.

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2020-02-04

作者简介:

王凡(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统规划、运行与控制; E-mail: wf15175762206@163.com

李海峰(1973—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: zhubin@js.sgcc.com.cn

胥国毅(1980—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向为高比例新能源电力系统分析与控制。E-mail: xu\_gy@ncepu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)