

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231126

## 含有调速器多死区环节的风水火系统频率稳定分析

周子超<sup>1</sup>, 吴水军<sup>2</sup>, 束洪春<sup>1</sup>, 孙士云<sup>1</sup>, 冯海洋<sup>1</sup>, 邓涵<sup>1</sup>, 徐韬<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650500; 2. 云南耀宇电力有限公司, 云南 昆明 650200)

**摘要:** “双高”背景下新型电力系统面临着非线性机理复杂的稳定问题, 传统机组调速器与风电控制器中死区非线性组合间的相互作用, 在一定程度上影响了系统的频率稳定性。为此, 在奈氏定理的基础上探究不同死区非线性组合下系统频率振荡的影响规律, 主要针对死区类型、死区大小和死区顺序3个方面进行研究, 涉及单死区系统和多死区系统。理论分析了其非线性系统的稳定性, 并根据稳定极限环条件求解系统的临界振幅和振荡频率。通过改变死区类型及顺序, 影响机组对系统频率的支撑能力, 指出了系统频率稳定与临界振幅的关系, 并在 Matlab/Simulink 中对上述理论分析进行了仿真验证。结果表明机组死区大小和类型均会改变系统的临界振幅和振荡频率, 为机组配置死区提供了一定的参考依据。

**关键词:** 频率稳定; 多死区环节; 非线性环节; 调速器; 扩展描述函数

### Frequency stability analysis of a wind-hydro-thermal system with a governor multi-dead-zone link

ZHOU Zichao<sup>1</sup>, WU Shuijun<sup>2</sup>, SHU Hongchun<sup>1</sup>, SUN Shiyun<sup>1</sup>, FENG Haiyang<sup>1</sup>, DENG Han<sup>1</sup>, XU Tao<sup>1</sup>

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Yaoyu Electric power Co., Ltd., Kunming 650200, China)

**Abstract:** Under the “double high” background, the new power system is faced with the stability problem of complex nonlinear mechanisms. The interaction between the nonlinear combination of the dead zone in the traditional unit governor and the wind power controller affects the frequency stability of the system to a certain extent. Therefore, on the basis of Nye’s theorem, the influence law of system frequency oscillation with different dead-zone nonlinear combinations is explored, mainly focusing on three aspects: dead-zone type, size and order, involving both single and multi-dead-zone systems. The stability of the nonlinear system is analyzed theoretically, and the critical amplitude and oscillation frequency of the system are determined from the stable limit cycle condition. By changing the type and order of the dead zone, the ability of the unit to support the system frequency is affected, and the relationship between system frequency stability and the critical amplitude is pointed out. The above theoretical analysis is simulated and verified in Matlab/Simulink. It is concluded that the size and type of the unit dead zone will change the critical amplitude and oscillation frequency of the system. This provides a certain reference for the unit to configure the dead zone.

This work is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 52037003).

**Key words:** frequency stabilization; multi-dead zone link; nonlinearity link; governor; extended describing function

## 0 引言

构建高比例新能源电力系统是实现我国能源转型的重要举措, 高比例新能源接入对新型电力系统频率稳定的影响存在众多亟待攻克的难题<sup>[1]</sup>。究其原因, 风电等高比例电力电子设备接入电网, 其风电附加控制结构复杂, 非线性特性显著, 降低了

系统的稳定性。因此风电变流器系统中的限幅、死区等非线性环节对频率振荡特性的演变起到了关键作用<sup>[2]</sup>。中国电网运行导则 GB/T40595《并网电源一次调频技术规定及实验导则》中规定, 风电场参与电网一次调频时调频死区范围为 0.03~0.10 Hz, 光伏电站调频死区范围为 0.02~0.06 Hz<sup>[3]</sup>。

针对死区非线性环节对系统频率稳定的研究, 目前常用单机多调速器的统一频率模型<sup>[4]</sup>, 但系统模型中的不同调速器和原动机组成了一个高阶系

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(52037003)

统, 导致系统求解面临着维数灾的难题, 文献[5]采用描述函数法分析不同非线性环节对频率振荡的影响。文献[6]在描述函数法的基础上进一步分析了不同死区类型对振荡幅值信号的抑制作用, 当采用普通型死区的系统为正阻尼或负阻尼时, 不同扰动下均能保证系统的频率稳定, 而调速器采用增强型死区的频率稳定性受扰动大小的影响。文献[7]研究了水电机组增强型调速器对电网频率稳定性的影响, 结果表明采用增强型死区调速器后, 在死区设定值附近容易产生自激的振荡。文献[8]通过阻抗分析法和奈奎斯特判据判定变流器并网稳定性。文献[9]通过描述函数法对不同死区类型进行分段建模, 继而以单机系统为例从数据角度证明了含增强型死区的正阻尼系统在特定情况下出现频率振荡的结论。文献[10]深入研究了调速器死区影响系统的振荡行为, 通过描述函数法解释了单机系统中不同死区对振荡频率的影响规律。文献[11]在传统描述函数法的基础上提出扩展描述函数, 将各机组调速器死区的描述函数整合统一, 并给出协调水电机组和火电机组调速器系统的参与度关系, 对研究死区非线性环节具有重要意义。

然而, 现有新能源的强非线性主要体现在电力电子器件的高频开断、变流器设备因敏感<sup>[12]</sup>过载和应力而设置的强非线性环节(限幅、死区)以及不同控制模式和运行工况下的控制切换<sup>[13]</sup>。其中部分文献开展了新能源死区非线性的研究, 文献[14]分析指出在新能源调频资源充足时, 普通型死区实际削弱新能源一次调频响应水平, 而增强型死区对系统频率最低点有一定的支撑, 但存在一定的突变, 对包含新能源机组的稳定运行产生不利的影 响。文献[15]采用描述函数法和奈奎斯特稳定判据求解出含死区的光伏电站和常规电源的调频控制增益的稳定范围, 对新能源调频参数的制定和整定起到了良好的参考和借鉴作用。文献[16]提出了一种风光水火参与系统调频的梯级方案, 通过一次调频死区的配合, 确定风光水火参与系统一次调频的顺序, 以提高云南电网异步互联系统的稳定性。

鉴于此, 本文在已有研究成果的基础上, 首先基于含调速器多死区的统一频率模型, 结合扩展描述函数等效得到不同机组下的非线性组合形式, 其组合形式为单死区系统和多死区系统。然后绘制发电机奈奎斯特曲线和随幅值变化的负倒函数曲线, 继而观察不同死区类型对曲线运动轨迹的影响, 并计算出系统的临界振幅和振荡频率。最后通过改变不同机组配置下的死区大小关系, 影响机组对系统频率支撑的能力, 进一步定量分析死区对系统频率

振荡的影响规律, 并在 Matlab/Simulink 中对上述理论分析进行了仿真验证。

## 1 考虑死区的风水火系统频率模型

在风电机组频率控制器、水电机组和火电机组调速器组成的系统模型中, 其含有的非线性死区环节导致频率稳定分析更加复杂。因此根据单机多调速器的统一频率模型搭建方法, 构建了风水火系统频率响应模型<sup>[17-18]</sup>, 如图 1 所示。主要包括水电机组调速器-原动机模型、火电机组调速器-原动机模型、双馈风机(double fed induction generator, DFIG)附加调频控制模型和等值发电机的传递函数。

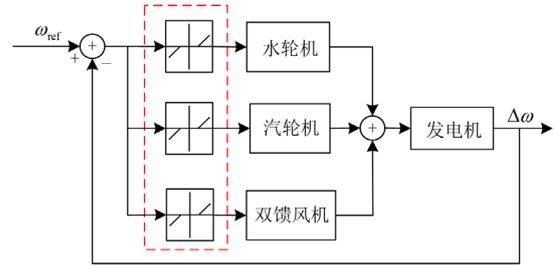


图 1 风水火系统频率响应模型

Fig. 1 Frequency response model of wind-hydro-thermal system

忽略系统网损, 考虑发电机阻尼系统与负荷频率调节, 等值发电机的传递函数  $G_s(s)$  为

$$G_s(s) = \frac{1}{Ms + D} \quad (1)$$

式中:  $M$  为发电机的转动惯量;  $D$  为发电机的阻尼系数。

水轮机为考虑水锤系数的 PID 控制模型<sup>[19]</sup>, 如式(2)和式(3)所示。

$$G_{ht}(s) = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5T_w s} \quad (2)$$

$$G_H(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{b_p K_1 + s} \frac{1}{1 + T_{GH} s} \quad (3)$$

式中:  $G_{ht}(s)$  为水轮机传递函数;  $G_H(s)$  为水轮机 PID 调速器模型传递函数;  $T_w$  为水锤效应时间常数;  $K_D$ 、 $K_P$  和  $K_I$  分别为调速器控制模型中的微分、比例和积分系数;  $b_p$  为调差系数;  $T_{GH}$  为伺服系统的时间常数。

汽轮机调速器考虑调差效应的一阶伺服系统, 简化传递函数如式(4)和式(5)<sup>[20]</sup>所示。

$$G_R(s) = \frac{1 + F_{HP} T_{RH} s}{(1 + T_{CH} s)(1 + T_{RH} s)} \quad (4)$$

$$G_{Rgov}(s) = \frac{1}{(1 + T_G s) R} \quad (5)$$

式中:  $G_R(s)$  为汽轮机传递函数;  $G_{Rgov}(s)$  为汽轮机调速器;  $F_{HP}$  为高压缸的功率占比;  $T_{RH}$  为再热时间常数;  $T_{CH}$  为主进气容积和气室时间常数;  $R$  为调差系数;  $T_G$  为伺服系统时间常数。

DFIG 附加调频控制采用惯性控制和下垂控制相结合的综合惯性控制, 简化传递函数如式(6)<sup>[18-21]</sup>所示。

$$G_w(s) = \frac{-k_{df}s}{1+T_{df}s} + \frac{-k_{pf}}{1+T_{pf}s} \quad (6)$$

式中:  $k_{pf}$  为 DFIG 下垂控制系数;  $T_{pf}$  为 DFIG 下垂控制响应时间常数;  $T_{df}$  为 DFIG 惯性控制响应时间常数;  $k_{df}$  为 DFIG 惯性控制响应系数。

## 2 不同死区环节的动作特点

实际系统中死区类型一般分为普通型死区和增强型死区, 分别如图 2 所示。图 2 中:  $\Delta f(t)$  为系统频率偏差;  $a$  为死区大小;  $x(t)$  为输入信号经过死区环节后的输出;  $K$  为死区特性的斜率;  $H$  为增强型死区达到动作值时产生的阶跃信号<sup>[7]</sup>。

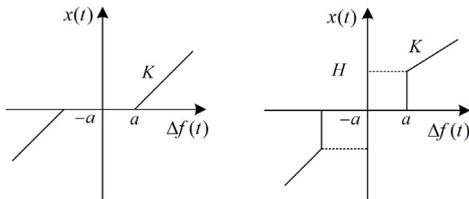


图 2 普通型死区和增强型死区

Fig. 2 Common dead zone and enhanced dead zone

普通型死区和增强型死区的输入输出关系如式(7)、式(8)<sup>[22]</sup>所示。

$$x(t) = \begin{cases} \Delta f(t) & |\Delta f(t)| \geq a \\ 0 & |\Delta f(t)| < a \end{cases} \quad (7)$$

$$x(t) = \begin{cases} \Delta f(t) - a & \Delta f(t) > a \\ 0 & |\Delta f(t)| \leq a \\ \Delta f(t) + a & \Delta f(t) < -a \end{cases} \quad (8)$$

假设以同一正弦信号为输入信号, 普通型死区和增强型死区的输出信号如图 3 所示。可以看出, 相比普通型死区, 增强型死区在到达动作门限值  $a$  时, 输出信号发生阶跃, 使得信号状态不连续。

### 2.1 非线性死区的描述函数法

描述函数法主要用来分析非线性系统的稳定性和自振荡问题, 并且不受系统阶次的限制, 将非线性系统经过谐波线性化处理转换为线性系统, 因其是一种近似的简化, 所以在运用描述函数法时, 需要满足一定的约束条件<sup>[23]</sup>。

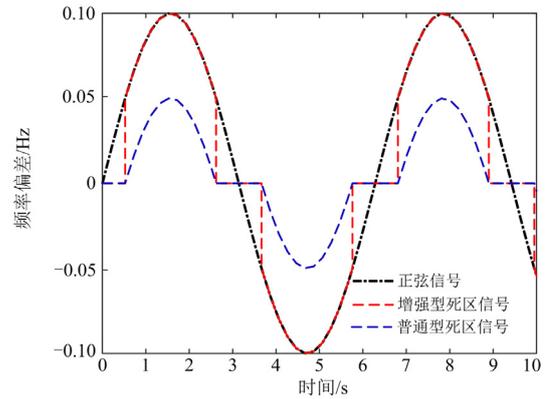


图 3 不同类型死区信号输出关系

Fig. 3 Output relationship of different types of dead zone signals

为应用描述函数的非线性奈奎斯特稳定判据, 一般将非线性系统等效变换为非线性系统典型结构, 其中系统中的非线性环节为  $N(A)$ , 线性环节为  $G(j\omega)$ <sup>[23]</sup>, 如图 4 所示。

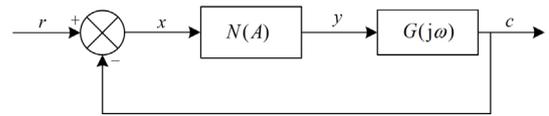


图 4 非线性系统典型结构

Fig. 4 Typical structure of nonlinear system

设非线性死区环节的输入信号为正弦信号, 表示为

$$x(t) = A \sin \omega t \quad (9)$$

式中,  $A$  和  $\omega$  分别为输入信号的幅值和角频率, 且  $A \geq a$ 。

根据普通型死区的非线性特性, 得出描述函数的表达式为

$$N_1(A) = \frac{2K}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{a}{A} - \frac{a}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2} \right] \quad (10)$$

根据增强型死区的非线性特性, 得出描述函数的表达式为

$$N_2(A) = K - \frac{2K}{\pi} \arcsin \frac{a}{A} + \frac{4H - 2aK}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2} \quad (11)$$

为了研究不同死区类型的非线性特性, 假设输入信号为正弦信号, 死区大小  $a$  为 0.002, 幅值  $A$  从 0.002 逐渐增大到 0.02。此时正弦信号经过非线性死区环节后, 其输出信号随着扰动幅值的增大, 死区环节的抑制作用逐渐减弱, 如图 5 所示。由此可知, 死区大小和扰动幅值决定输出信号, 且相比于普通型死区, 增强型死区的抑制作用更弱。

### 2.2 含非线性环节的系统稳定判据

若非线性系统转换为图 4 所示的非线性典型结

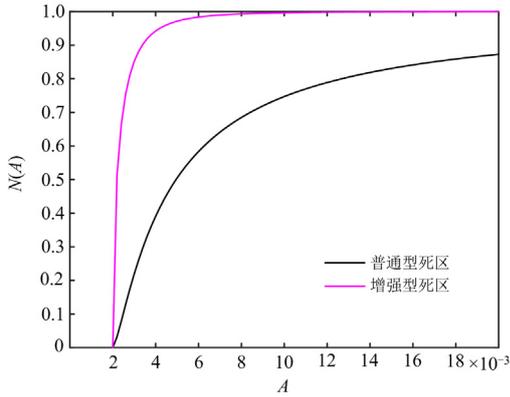


图 5 不同死区对振荡信号幅值的抑制作用

Fig. 5 Suppression of oscillation signal amplitude by different dead zones

构形式，且非线性环节和线性环节满足描述函数应用的条件，则根据奈奎斯特稳定判据来分析非线性系统的稳定性，具体通过观察复平面上  $G(j\omega)$  曲线与负倒描述函数  $-1/N(A)$  曲线的相交情况<sup>[23]</sup>。

(1) 当  $-1/N(A)$  曲线被  $G(j\omega)$  曲线包围时，系统不稳定。

(2) 当  $-1/N(A)$  曲线不被  $G(j\omega)$  曲线包围时，系统稳定。

(3) 当  $-1/N(A)$  曲线与  $G(j\omega)$  曲线相交时，系统产生等幅振荡，不同的交点可能会产生不同振幅的频率周期运动。一般从不稳定区域变化到稳定区域，该点为自振点，反之该点不是自振点。通过式(12)计算出交点对应的临界振幅  $A_c$  和振荡频率  $\omega$ 。

$$\begin{cases} |N(A)||G(j\omega)|=1 \\ \angle N(A) + \angle G(j\omega) = -\pi \end{cases} \quad (12)$$

### 3 不同死区对频率稳定的影响分析

在实际系统中，不同死区类型具有不同的非线性特性，死区的差异性对系统频率稳定存在重要的影响；而死区作为平衡抑制频率振荡和保持调频能力的一种有效手段，合理配置调速器死区，能够抑制系统的频率振荡。因此本节分别在单死区风水系统和多死区风水火系统中，研究不同死区设置对系统频率振荡的影响规律。

#### 3.1 单死区风水系统的频率稳定性分析

在电力系统中，DFIG 死区一般设置在附加调频控制系统中，而水轮机和汽轮机死区往往设置在调速器系统中，相比汽轮机，水轮机调速器具有强非线性，两者动态特性差异较大<sup>[24]</sup>。而文献[15]设置常规机组和新能源死区参数相同，在运用描述函数法时，将其等效为同一个描述函数<sup>[23]</sup>。因此建立

单死区风水系统等效模型如图 6(a)所示，将水轮机和 DFIG 死区等效为一个死区环节  $N_{Hw}(A)$ ，等效后如图 6(b)所示，图中 DFIG 附加调频控制采用下垂控制策略，根据非线性奈奎斯特稳定性判据分析 DFIG 加入含水轮机的系统后，不同死区类型对系统的影响。

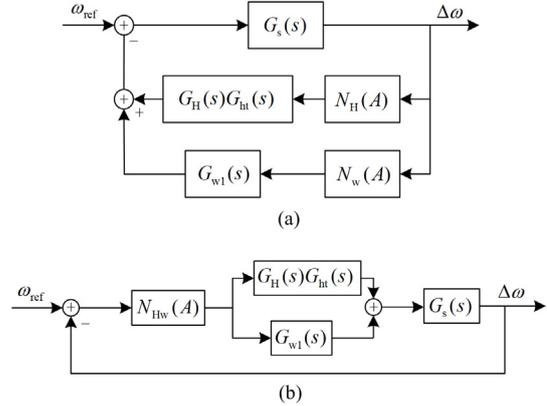


图 6 单死区系统的统一频率模型

Fig. 6 Unified frequency model of single dead-zone system

考虑单死区闭环系统的特征方程为

$$\begin{cases} 1 + G_{Hw}(s)N_{Hw}(A) = 0 \\ G_{Hw}(s) = G_{w1}(s)G_s(s) + G_H(s)G_s(s) \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$G_{w1} = \frac{-k_{pf}}{1 + T_{pf}s} \quad (14)$$

式中： $G_{Hw}(s)$  为风水系统等效传递函数； $N_{Hw}(A)$  为风水系统等效描述函数。参数取值如表 1 所示。

表 1 单死区系统相关参数

Table 1 Related parameters of single dead-zone system

参数	数值	参数	数值
$T_w$	1	$T_{GH}$	0.2
$K_D$	0.7	$K_P$	0.5
$K_I$	1	$b_p$	0.04
$k_{pf}$	0.9	$T_{pf}$	0.3
$a$	0.002	$M$	10
$D$	0.4	—	—

将死区描述函数  $N_1(A)$  和  $N_2(A)$  分别代入式(13)中，绘制不同死区类型所对应的单死区风水系统的奈奎斯特曲线，如图 7 所示。

根据图 7 可知： $-1/N_{Hw1}(A)$  普通型死区和  $-1/N_{Hw2}(A)$  增强型死区的负倒描述函数曲线随着输入幅值  $A$  的增大不断变化，从稳定区域进入不稳定区域，此时存在极限条件；由式(12)可计算出单死区系统的临界振幅和振荡频率，如表 2 所示。

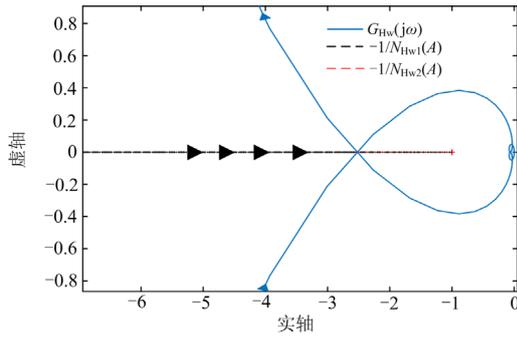


图 7 单死区负倒描述函数与奈奎斯特曲线

Fig. 7 Single dead-zone negative reciprocal description function and Nyquist curve

表 2 单死区风水系统临界振幅和振荡频率

Table 2 Critical amplitude and oscillation frequency of single dead zone wind-hydro system

死区类型	死区大小 $a$	临界振幅 $A_c$	振荡频率 $\omega$ /(rad/s)
普通型	0.002	0.004	0.194
增强型	0.002	0.0021	0.194

根据上述计算结果可得, 在单死区风水系统中, 较之增强型死区, 采用普通型死区时系统的临界振幅  $A_c$  更大, 更有利于改善系统的频率稳定性。

### 3.2 多死区风水火系统频率稳定性分析

单死区系统一般仅存在于部分特殊情况中, 而实际中各机组调速器死区参数和类型的复杂非线性组合将严重影响系统的频率稳定性。因此本节进一步研究风水火系统的频率稳定性。

如图 8(a)所示, 基于多调速器系统的模型将单回路中的死区与调速器等效为扩展描述函数, 形成式(15)所示的多死区系统等效扩展描述函数, 再将各机组扩展描述函数等效为统一的非线性环节如式(16)所示; 此时系统转换为非线性典型结构如图 8(b)所示, 其中,  $G_s(s)$  为线性部分,  $G_{RHW}(s)$  为非线性部分。最后通过非线性典型结构绘制奈奎斯特曲线和负倒描述函数曲线, 根据非线性 Nyquist 稳定性判据来分析多死区系统的频率稳定性。

$$\begin{cases} G_{ew}(s) = N_w(A, a)G_w(s) \\ G_{er}(s) = N_r(A, a)G_r(s)G_{Rgov}(s) \\ G_{eh}(s) = N_h(A, a)G_h(s)G_{ht}(s) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $G_{ew}(s)$  为 DFIG 扩展描述函数;  $G_{er}(s)$  为汽轮机扩展描述函数;  $G_{eh}(s)$  为水轮机扩展描述函数。

$$G_{RHW}(j\omega) = G_{ew}(j\omega) + G_{eh}(j\omega) + G_{er}(j\omega) \quad (16)$$

式中,  $G_{RHW}(j\omega)$  为输入扰动幅值  $A_0$  和转速  $\omega$  的函数。

此时在不同的频率  $f$  下, 非线性多死区扩展描述函数的幅值和相角也将随着扰动幅值的变化趋于

稳定<sup>[11]</sup>; 这是由于描述函数  $N(A)$  自身的特性, 当扰动幅值相对死区特别大时, 死区的作用也被减弱, 即相角和幅值趋于稳定。因此, 在适当的频段下, 改变非线性部分  $G_{RHW}(j\omega)$  中的死区类型和大小, 分析风水火系统频率振荡的稳定性。

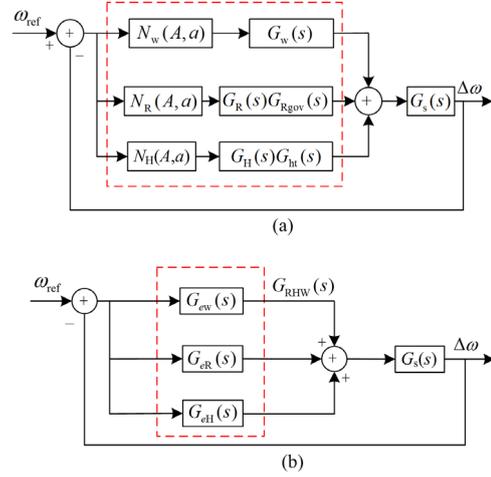


图 8 多死区系统的统一频率模型

Fig. 8 Unified frequency model of multi-dead-zone system

首先分析 DFIG 附加频率控制、水轮机调速器和火电机组调速器都采用普通型死区的情况, 负倒描述函数  $-1/G_{RHW}(A_0)$  曲线和发电机  $G_s(j\omega)$  奈奎斯特曲线如图 9 所示。

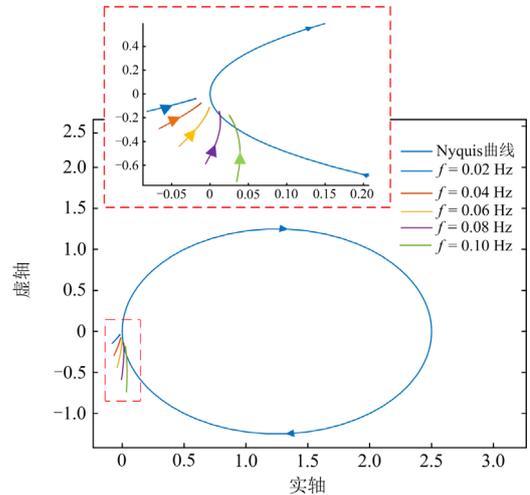


图 9 多死区系统负倒描述函数与奈奎斯特曲线

Fig. 9 Multi-dead-zone negative reciprocal description function and Nyquist curve

当振荡频率不同时, 扩展描述函数  $-1/G_{RHW}(A_0)$  与  $G_s(j\omega)$  奈奎斯特曲线会产生不同的交点, 根据 Nyquist 稳定性判据可知, 当负倒描述函数与奈奎斯特曲线不相交时, 系统是稳定的, 当负倒描述函数与奈奎斯特曲线相交时, 通过式(12)进一步计算临界

振幅  $A_c$  和振荡频率  $\omega$ ；当扰动幅值  $A_0$  小于临界振幅  $A_c$  时，系统稳定；当扰动幅值  $A_0$  大于临界振幅  $A_c$  时，系统不稳定。

由于新能源电力电子响应速度较快，死区设置范围较大且较灵活，因此当 DFIG 附加调频控制采用增强型死区、水电机组和火电机组采用普通型死区时，绘制 Nyquist 曲线如图 10 所示。

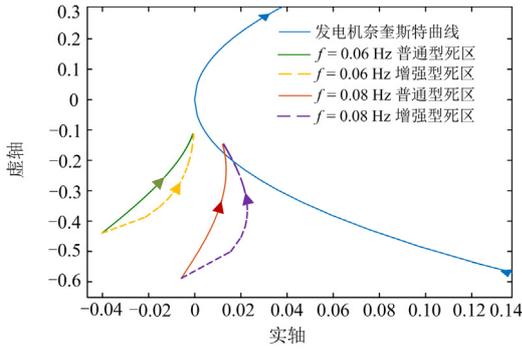


图 10 增强型死区 Nyquist 图

Fig. 10 Enhanced dead-zone Nyquist diagram

从图 10 中能够清晰地看出，增强型死区相比普通型死区具有突变性，呈现出负倒描述函数与奈奎斯特曲线相切的现象，负倒描述函数曲线快速从稳定区域切入不稳定区域，又切出不稳定区域，极端情况甚至会反复切入切出，致使系统存在不稳定周期运动。值得注意的是，Nyquist 稳定判据中存在不同的极限环<sup>[23]</sup>，本文主要考虑  $-1/N(A)$  曲线从稳定区到不稳定区的交点，防止进入包围圈，并不考虑增强型死区后续的极端情况。因此将通过式(12)计算临界振幅  $A_c$  和振荡频率  $\omega$ ，探究不同死区参数和死区类型对临界振幅和振荡频率的影响规律。

#### 4 算例分析

本节以图 1 的风水火系统频率响应模型为例，在 Matlab/sumilink 中搭建了系统频率响应模型，具体参数如下：发电机等值模型参数  $M=10$ 、 $D=0.4$ ；水轮机参数  $K_D=0.7$ 、 $K_I=1$ 、 $K_P=0.5$ 、 $T_w=1$ 、 $T_{GH}=0.2$ 、 $b_p=0.04$ ；汽轮机参数  $F_{HP}=1$ 、 $T_{RH}=10$ 、 $T_{CH}=10$ 、 $R=0.0303$ ， $T_G=12$ ；DFIG 附加调频控制参数  $k_{df}=0.8$ 、 $T_{df}=0.01$ 、 $k_{pf}=0.2$ 、 $T_{pf}=0.3$ 。利用 3.2 节中的方法，DFIG 附加调频控制分别采用普通型死区和增强型死区时，计算系统产生频率振荡的临界振幅和振荡频率，其中临界振幅和死区大小为标么值，振荡频率为有名值，单位为 rad/s。

#### 4.1 DFIG 设置普通型死区的系统频率稳定分析

首先分析水电机组调速器、火电机组调速器和 DFIG 附加频率控制都设置普通型死区的情况，水轮机组调速器死区  $a_H$  为 0.002，火电机组调速器死区  $a_R$  为 0.0015，DFIG 死区  $a_w$  为 0.0025，以此作为基准算例 1。

##### 1) 改变各机组死区大小

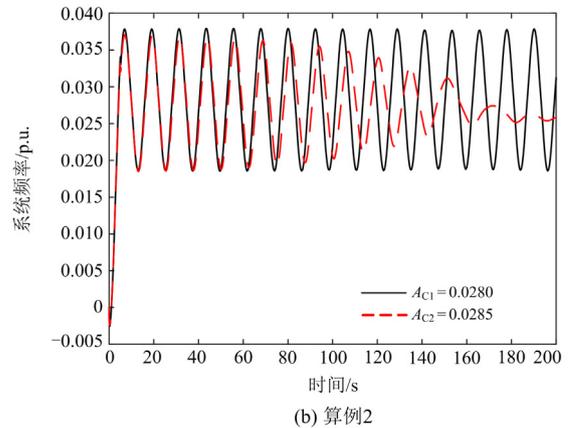
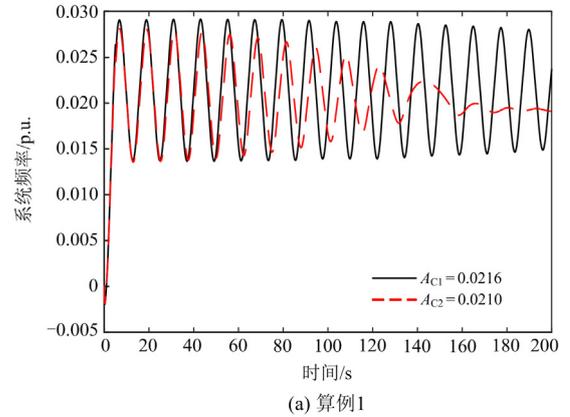
在算例 1 的基础上改变各机组普通型死区的大小，死区同时增大和减小的两种情况分别对应算例 2 和算例 3，计算结果如表 3 所示。

表 3 普通型死区临界振幅和振荡频率

Table 3 Critical amplitude and oscillation frequency of ordinary dead zone

算例	水机死区 $a_H$	火机死区 $a_R$	风机死区 $a_w$	临界振幅 $A_c$	振荡频率 $\omega$ (rad/s)
1	0.002	0.0015	0.0025	0.0215	0.46
2	0.0025	0.002	0.003	0.0284	0.458
3	0.0015	0.001	0.002	0.0199	0.458

为了验证临界振幅和振荡频率数值计算的正确性，通过输入不同大小的扰动幅值信号进行仿真，观察系统频率响应曲线，分析系统频率稳定性；算例 1、算例 2 和算例 3 所对应的系统频率响应曲线如图 11 所示。



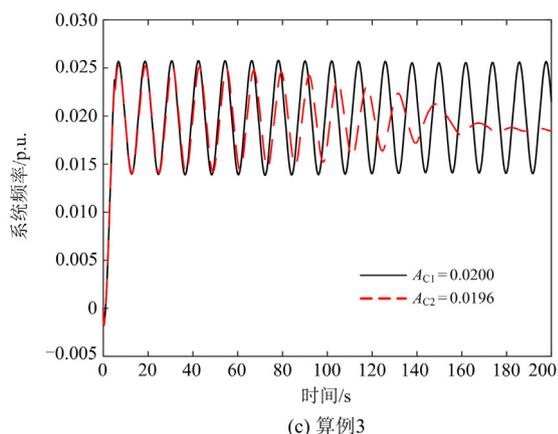


图 11 不同死区配置的系统频率响应曲线  
Fig. 11 System frequency response curves with different dead zones

如图 11(a)算例 1 所示, 临界振幅  $A_c$  为 0.0215, 当扰动幅值  $A_{c1}$  为 0.0216 时, 此时系统频率响应曲线持续振荡, 而扰动幅值  $A_{c2}$  为 0.021 时, 系统频率响应曲线经过一段时间振荡后, 逐渐趋于稳定; 证明了当扰动幅值小于临界振幅时, 系统能够达到稳定, 验证了 3.2 节中的理论分析。同理算例 2 和算例 3 也有类似的情况。

对比算例 1、算例 2 和算例 3 可以发现, 随着死区的增大, 系统振荡的临界振幅也随之增大, 从物理意义上看, 死区值越大, 调速器就越难以引起动作, 需要穿越的扰动幅值范围就越大, 因此激发系统振荡的临界振荡幅值也越大。

### 2) 改变各机组死区大小及关系

为了研究不同类型死区配置下的各类机组参与程度对频率振荡的影响, 同时排除死区本身特性(死区越大, 扰动需要穿越的幅值范围越大)对振荡的影响, 因此固定死区大小随机改变各机组的动作顺序, 计算得到系统的临界振幅和振荡频率, 如表 4 所示, 再将表中各算例与算例 1 进行比较分析。

表 4 不同死区顺序下的临界振幅和振荡频率

Table 4 Critical amplitude and oscillation frequency under different dead-time sequences

算例	水机死区 $a_H$	火机死区 $a_R$	风机死区 $a_W$	临界振幅 $A_c$	振荡频率 $\omega/(rad/s)$	死区关系
4	0.0015	0.002	0.0025	0.0194	0.451	$a_H < a_R < a_W$
5	0.0015	0.0025	0.002	0.0189	0.445	$a_H < a_W < a_R$
6	0.0025	0.002	0.0015	0.0210	0.4595	$a_W < a_R < a_H$
7	0.002	0.0025	0.0015	0.0215	0.449	$a_W < a_H < a_R$
8	0.0025	0.0015	0.002	0.0211	0.464	$a_R < a_W < a_H$

如图 12 所示, 当扰动幅值为 0.019 小于算例 4 的临界振幅时, 系统频率响应曲线经短时振荡后逐渐衰减; 大于算例 5 的临界振幅, 系统频率响应曲线逐渐发散; 小于算例 1 的临界振幅, 激发的振荡快速衰减。

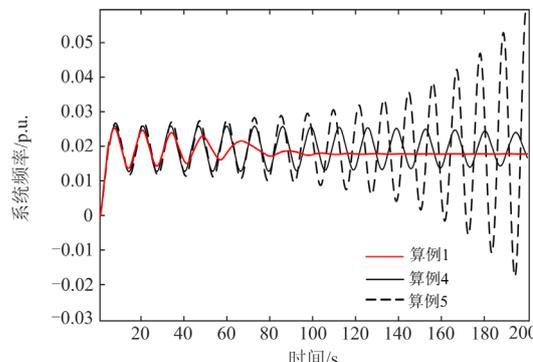


图 12 水轮机组优先动作情况对比图  
Fig. 12 Comparison chart of priority action of hydraulic turbine unit

如图 13 所示, 当扰动幅值为 0.0212 时, 算例 6 激发的系统频率响应曲线持续振荡, 系统不稳定。

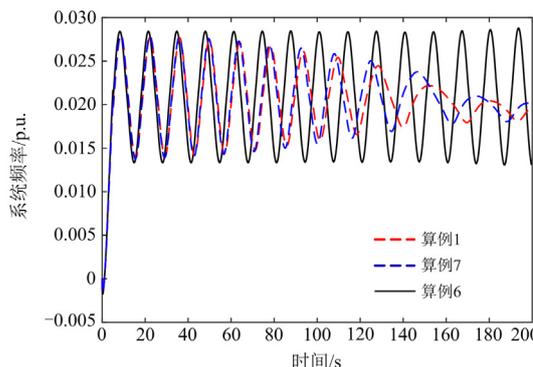


图 13 DFIG 优先动作情况对比图  
Fig. 13 Comparison chart of priority action of DFIG

如图 14 所示, 当扰动幅值为 0.0213 时, 算例 8 引起系统频率的等幅振荡, 系统不稳定。

对比算例 4 和算例 5 可知, 水电机组优先动作的情况下, 减小火电机组的参与度容易降低风水火系统的稳定性; 其次算例 6 和算例 7 的分析结果表明, 在 DFIG 优先动作的情况下, 提高水电机组的参与度容易恶化风水火系统的稳定性, 最后通过对比算例 1 和算例 8 得出提高火电机组的参与度更有利于抑制频率振荡。

### 4.2 DFIG 设置增强型死区的系统稳定性分析

普通型死区的存在会削弱新能源的一次调频能力, 进而可能威胁系统的频率安全, 而增强型死区对新能源调频能力影响可以忽略, 但由于增强型

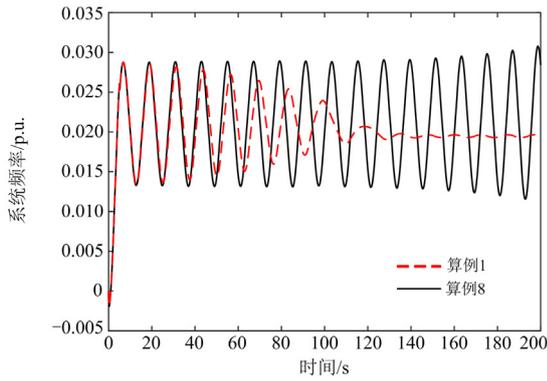


图 14 火电机组优先动作情况对比图

Fig. 14 Comparison chart of priority action of thermal power units

死区存在突变性，这可能会对新能源机组的运行稳定产生不利的影响<sup>[14-25]</sup>。为满足充分利用新能源调频资源这一原则，将 DFIG 死区类型更改为增强型，以算例 10 作为本节研究的基准算例，研究增强型死区环节对系统频率稳定性的影响。

1) 改变 DFIG 死区大小

本节采用单一变量原则，仅改变 DFIG 增强型死区大小，计算临界振幅与振荡频率如表 5 所示。

表 5 含增强型死区的临界振幅和振荡频率

Table 5 Critical amplitude and oscillation frequency with enhanced dead zone

算例	死区类型和大小			临界振幅 $A_c$	振荡频率 $\omega/(\text{rad/s})$
	普通型 $a_H$	普通型 $a_R$	增强型 $a_w$		
9	0.002	0.0015	0.003	0.03	0.45
10	0.002	0.0015	0.0025	0.0214	0.453
11	0.002	0.0015	0.0022	0.0199	0.452

当扰动幅值为 0.0210 时，系统频率响应曲线如图 15 和图 16 所示。对比算例 1 和算例 10 可知，仅更改 DFIG 死区类型时，采用增强型死区系统振荡幅度更大。

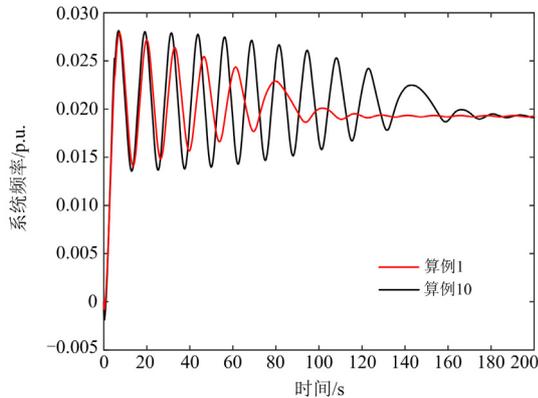


图 15 DFIG 设置不同死区类型对比

Fig. 15 Comparison diagram of different dead zone types of DFIG

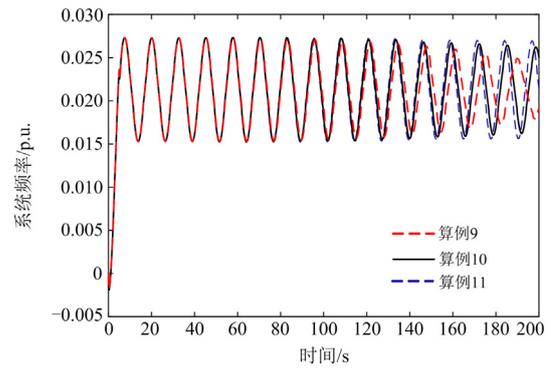


图 16 DFIG 增强型死区大小对比

Fig. 16 Comparison of DFIG enhanced dead zone size

图 16 中算例 9 和算例 11 分别为 DFIG 增强型死区增大和减小的情况，当扰动幅值为 0.215 时，相对算例 10，算例 9 经过一段时间后振荡幅度减小，算例 11 振荡幅度增加，表明了 DFIG 增强型死区的大小会影响临界振幅，且改变死区类型为增强型死区时，改变死区大小与临界振幅数值同样正相关。

2) 改变各机组死区大小及关系

同样为了避免死区自身对系统频率稳定的影响，改变机组的动作顺序，进一步研究增强型死区大小对系统频率的影响规律。同时改变风水火系统中各机组的参与度，将表 6 中的算例分别进行仿真，如图 17—图 18 所示。

表 6 改变死区大小和类型的临界振幅和振荡频率

Table 6 Critical amplitude and oscillation frequency of changing the size and type of dead zone

算例	死区类型和大小			临界振幅 $A_c$	振荡频率 $\omega/(\text{rad/s})$	死区关系
	普通型 $a_H$	普通型 $a_R$	增强型 $a_w$			
10	0.002	0.0015	0.0025	0.0214	0.453	$a_R < a_H < a_w$
12	0.0025	0.0015	0.002	0.0222	0.458	$a_R < a_w < a_H$
13	0.0025	0.002	0.0015	0.0223	0.454	$a_w < a_R < a_H$
14	0.002	0.0025	0.0015	0.0191	0.445	$a_w < a_H < a_R$
15	0.0015	0.002	0.0025	0.0092	0.444	$a_H < a_R < a_w$
16	0.0015	0.0025	0.002	0.0029	0.387	$a_H < a_w < a_R$

如图 17 所示，在 DFIG 优先动作的情况下，算例 13 和算例 14 中水电机组和火电机组的参与度不同，由于扰动幅值小于算例 13 的临界振幅，激发的振荡逐渐衰减，而算例 14 的临界振幅小于扰动幅值，系统频率响应曲线持续振荡，系统不稳定。

如图 18 所示，在火电机组优先动作的情况下，扰动发生后，算例 12 中的 DFIG 在火电机组后动

作, 水电机组经过反调后才参与动作, 此时系统频率响应曲线经过一段时间振荡后逐渐趋于稳定。而算例 10 中 DFIG 与水电机组动作顺序相反, 系统频率响应曲线持续振荡。

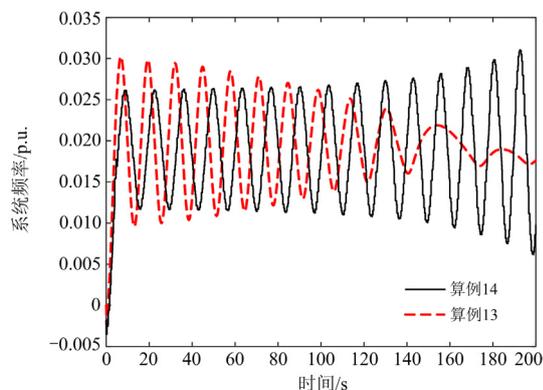


图 17 DFIG 增强型死区优先动作

Fig. 17 DFIG enhanced dead zone priority action

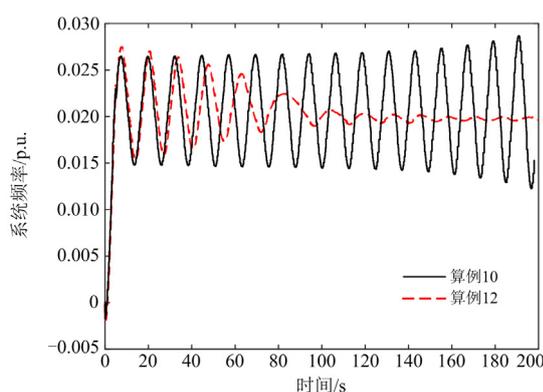


图 18 火电机组死区优先动作

Fig. 18 Dead zone priority action of thermal power unit

如图 19 所示, 在水电机组优先动作的情况下, 算例 15 和算例 16 的区别在于 DFIG 与火电机组的先后动作顺序不同, 算例 15 在火电机组的支撑下, 激发的振荡逐渐稳定。而算例 16 由于火电机组未及时参与调节, 系统频率持续振荡, 且呈发散趋势, 系统不稳定。从表 6 中的计算结果也能明显看出, 水电机组参与度最大的情况下, 临界振幅快速下降, 反映了系统频率的不稳定性。

最后由上述可知, 在 DFIG 设置增强型死区的情况下, 当火电机组参与度最大时, 增大 DFIG 的参与度有利于抑制系统频率的振荡; 当 DFIG 参与度最大时, 增大火电机组的参与度能够改善风水火系统的稳定程度, 而增大水电机组的参与度恶化了系统的稳定程度; 当水电机组参与度最大时, 优先提高火电机组的参与度对系统的稳定更有益。

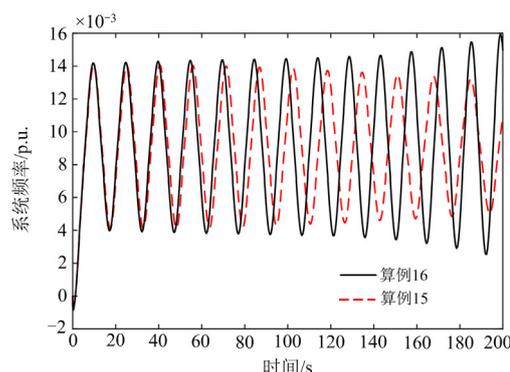


图 19 水电机组死区优先动作

Fig. 19 Dead zone priority action of hydro-turbine unit

## 5 结论

本文基于扩展描述函数及奈氏定理, 针对火电机组、水电机组和风电控制器中死区非线性组合引起的振荡机理进行了分析, 指出了临界振幅与系统频率稳定的关系, 并通过理论和仿真分析得出了以下结论。

1) 在单死区系统中, 当水轮机调速环节和 DFIG 附加频率控制环节分别采用普通型死区和增强型死区时, 前者更有利于抑制系统频率的振荡。

2) 在多死区系统中, 水电机组调速器、火电机组调速器和 DFIG 附加频率控制同时应用普通型死区, 当水电机组参与度最高时, 减小火电机组的参与度, 容易恶化系统的频率稳定性, 而适当提高 DFIG 参与度则会改善系统稳定性; 当 DFIG 参与度最高时, 增加水电机组的参与度将恶化系统的频率稳定性, 提高火电机组的参与度更有利于抑制频率振荡。

3) 在结论 2) 的基础上 DFIG 采用增强型死区, 当火电机组参与度最高时, 提高水电机组参与度将降低系统频率稳定性, 而增加 DFIG 参与度将会改善系统频率稳定性。当水电机组参与度最高时, 优先考虑提高火电机组的参与度, 更有利于增强系统频率稳定性。

由上述不同死区环节对系统频率振荡影响规律的研究可发现: 机组死区大小与临界振幅正相关; 死区类型也会改变临界振幅及振荡频率。为系统频率稳定评估及死区参数设置提供了一定的参考依据。

## 参考文献

- [1] 宫泽旭, 艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析(一): 机理模型与稳定判据适用性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4405-4419.

- GONG Zexu, YAERMAIMAITI·Ailixier, XIN Huanhai, et al. Small signal stability analysis of equipment in renewable energy power system (part I): mechanism model and adaptation of stability criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4405-4419.
- [2] 吴天昊, 谢小荣, 姜齐荣. 风电系统次同步等幅振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2689-2699.
- WU Tianhao, XIE Xiaorong, JIANG Qirong. On subsynchronous sustained oscillation issues of wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2689-2699.
- [3] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T40595—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guide for technology and test on primary frequency control of grid connected power resource: GB/T 40595—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [4] 黄伟, 段荣华, 江崇熙, 等. 多机系统超低频振荡稳定分析与调速器参数优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 185-191.
- HUANG Wei, DUAN Ronghua, JIANG Chongxi, et al. Stability analysis of ultra-low frequency oscillation and governor parameter optimization for multi-machine system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 185-191.
- [5] 薛安成, 王嘉伟, 刘晓博, 等. 电力系统超低频频率振荡机理分析与抑制研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 553-568.
- XUE Ancheng, WANG Jiawei, LIU Xiaobo, et al. Survey and prospect of ultra-low frequency oscillation mechanism analysis and suppression in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 553-568.
- [6] 高琴, 刘清晨, 陈亦平, 等. 不同调速器死区特性对系统频率稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3575-3581.
- GAO Qin, LIU Qingchen, CHEN Yiping, et al. Influence of different deadbands on the frequency stability[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3575-3581.
- [7] 张建新, 刘蔚, 邱建, 等. 增强型调速器对电网超低频振荡稳定性的影响[J]. 南方电网技术, 2019, 13(7): 17-24.
- ZHANG Jianxin, LIU Wei, QIU Jian, et al. Influence of enhanced governor on ultra-low frequency oscillation stability of power grid[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(7): 17-24.
- [8] 刘普, 崔艺博, 刘兆峰, 等. 基于阻抗分析法的并网变流器稳定性统一分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 114-125.
- LIU Pu, CUI Yibo, LIU Zhaofeng, et al. The unified analysis method of grid-connected converter stability based on impedance analysis[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 114-125.
- [9] 谢棚, 王德林, 郭良杰, 等. 调速器死区对水电高占比电力系统频率稳定的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 89-96.
- XIE Peng, WANG Delin, GUO Liangjie, et al. Analysis of influence of governor deadband on frequency stability of power system with high proportion of hydropower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 89-96.
- [10] 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 deadband of governor on frequency oscillation in single machine equivalent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 107-112, 128.
- [11] 范成围, 陈刚, 史华勃, 等. 基于统一频率模型的多死区环节对频率振荡影响的分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 164-171.
- FAN Chengwei, CHEN Gang, SHI Huabo, et al. Analysis of multi-deadband link influence on frequency oscillation based on unified frequency response model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 164-171.
- [12] 程静, 苏乐, 岳雷. 双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 1-13.
- CHENG Jing, SU Le, YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 1-13.
- [13] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [14] 张峰, 游欢欢, 丁磊. 新能源一次调频死区影响机理建模及系数修正策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 158-167.
- ZHANG Feng, YOU Huanhuan, DING Lei. Influential

- mechanism modelling of dead band in primary frequency regulation of renewable energy and its coefficient correction strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023,47(6): 158-167.
- [15] 赵大伟, 马进, 钱敏慧, 等. 光伏电站参与大电网一次调频的控制增益研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 425-435. 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[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 425-435.
- [16] 张健, 李文锋, 王晖, 等. 多电源梯级调频方案及风电场级调频时序优化策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 93-100. ZHANG Jian, LI Wenfeng, WANG Hui, et al. Multi-source cascaded frequency modulation scheme and time-sequence optimization strategy of frequency modulation at level of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 93-100.
- [17] 杨康, 谢丽军, 熊浩, 等. 考虑风-储频率响应的智能电网频率特征分析[J/OL]. 电测与仪表: 1-10[2023-11-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20220630.2229.002.html>. YANG Kang, XIE Lijun, XIONG Hao, et al. Analysis of frequency characteristics of power system with wind power-energy storage participating in frequency modulation[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation:1-10[2023-11-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20220630.2229.002.html>.
- [18] 周霞, 刘懿诗, 戴剑丰, 等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 30-44. ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power energy storage flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30-44.
- [19] 范成围. 水火机组调速器死区对超低频振荡的影响分析[J]. 四川电力技术, 2020, 43(4): 5-8, 37. FAN Chengwei. Analysis of governor deadband influence of hydro-thermal generation unit on ultra-low frequency oscillation[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2020, 43(4): 5-8, 37.
- [20] CAO Y, ZHANG H, ZHANG Y, et al. Extending SFR model to quantitatively assess the influence of thermal states on primary frequency response capability[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(19).
- [21] MI Yang, CHEN Boyang, CAI Pengcheng, et al. Frequency control of a wind-diesel system based on hybrid energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 446-458.
- [22] 李东东, 孙雅茹, 徐波, 等. 考虑频率稳定的新能源高渗透率电力系统最小惯量与一次调频容量评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 54-61. LI Dongdong, SUN Yaru, XU Bo, et al. Minimum inertia and primary frequency capacity assessment for a new energy high permeability power system considering frequency stability[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 54-61.
- [23] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [24] 何廷一, 束洪春, 李胜男, 等. 风电参与调频对电力系统超低频振荡的影响分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(8): 1113-1121. HE Tingyi, SHU Hongchun, LI Shengnan, et al. Analysis of the influence of wind power participating in frequency regulation on the ultra-low frequency oscillation of power system[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(8): 1113-1121.
- [25] NEEVATIKA V, NARENDRA K, SAKET G, et al. Review of sub-synchronous interaction in wind integrated power systems: classification, challenges, and mitigation techniques[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 277-302.

收稿日期: 2023-08-31; 修回日期: 2023-12-08

作者简介:

周子超(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析; E-mail: 846637618@qq.com

孙士云(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 422416503@qq.com

(编辑 许威)