

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222513

# 调节系统死区对一次调频动态性能的影响分析

魏加达<sup>1,2</sup>, 赵训新<sup>1,2</sup>, 莫 凡<sup>1,2</sup>, 程远楚<sup>3</sup>, 阳瑞霖<sup>1,2</sup>

(1. 国家电力投资集团水电产业创新中心, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南五凌电力科技有限公司, 湖南 长沙 410000; 3. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 水电机组一次调频功能对维持电网安全稳定运行承担日益重要的作用,需保证并入电网的机组具备良好的一次调频性能。水轮机调节系统存在的各类死区非线性因素对一次调频动态性能的影响不可忽略。全面分析了调节系统各环节存在的死区非线性,基于建立的高准确性的水电机组一次调频模型,探究了在大、小频差下频率死区、开度死区、功率死区、随动系统死区等对一次调频响应性能的影响,着重揭示了小扰动下一次调频不动作或与随动系统死区有关,为水电机组一次调频功能改善与优化提供了重要的理论指导。

**关键词:** 水轮机调节系统;一次调频;死区;数学模型;动态性能

**中图分类号:** TV734.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0190-05

## 1 引言

水电机组在电网中更多承担调频作用,其一次调频功能对维持电网稳定、保证供电质量至关重要<sup>[1]</sup>。目前由于对水电机组特性研究不够,在电网故障时发挥良好调频性能的机组并不多,甚至导致系统振荡与不稳定现象产生<sup>[2-3]</sup>。此外,新能源的不断接入造成系统频率小扰动增多,小扰动下机组调频性能较差,频繁被电网考核,成为行业内亟待解决的痛点问题<sup>[4-5]</sup>。因而,有必要对一次调频性能影响因素开展深入研究。调节系统中存在各类复杂非线性因素对一次调频性能影响较大,不可忽视,特别是死区的影响。2016年,云南电网异步运行试验中便出现了调速器死区( $\pm 0.05$  Hz)附近的频率振荡现象<sup>[6]</sup>。但目前关于一次调频与调速系统死区的耦合研究主要为不同频率死区对于电网超低频振荡现象的影响与抑制<sup>[7-9]</sup>,而鲜有研究着重考虑调节系统死区对于机组一次调频性能本身的影响,更是忽视了开度死区、功率死区、随动系统死区等的影响。本文在充分分析调节系统死区非线性的基础上,建立了能反映水电机组一次调频真实特性的非线性模型,开展了频率/开度/功率/随动系统死区对一次调频各项性

能指标的影响研究,为改善水电机组一次调频性能、维持电网稳定提供了重要的理论指导。

## 2 水轮机调节系统死区非线性分析

### 2.1 频率死区

为了保证机组的稳定运行,避免频繁调节,在PID控制环节前设置了一次调频人工频率死区。当频率扰动大小未超出频率调节死区时,机组不产生对有功功率的调整。只有频差大小超过所设定的人工频率死区值时,机组才产生相应一次调频动作,改变机组有功功率的输出。

### 2.2 开度死区和功率死区

开度死区与功率死区比较类似,分别作用于调速器开度模式与功率模式下。开度死区通常设置在永态转差系数 $b_p$ 的反馈环节前。当频差大小越过频率死区,调速器根据频差信号将其转换成开度控制信号,越过开度死区后,再按整定的永态转差系数 $b_p$ 改变导叶开度,调整有功功率。为避免机组出力波动造成接力器反复抽动,在功率反馈与功率给定的比较环节后设置了功率死区。当频差大小越过频率死区,调速器根据频差信号计算出有功功率给定值,经过功率比较环节后得到的偏差值越过功率死区后,机组再按整定的调

收稿日期: 2022-11-30, 修回日期: 2023-01-03

基金项目: 国家电力投资集团统筹研发经费支持项目(TC2020SD01)

作者简介: 魏加达(1996-),男,硕士,研究方向为自动装置诊断分析,E-mail:wei\_wjd@wldl.com.cn

通讯作者: 程远楚(1962-),男,教授、博导,研究方向为水电机组自动控制,E-mail:yccheng@whu.edu.cn

差率  $e_p$  改变机组有功功率。

### 2.3 随动系统死区

考虑到主配压阀漏油量与搭叠量相关,为了减小在稳定平衡状态下的漏油量,国内通常取主配压阀搭叠量为正。当调速器控制信号输入,必须驱动主配压阀越过搭叠量后才能输出控制接力器的压力油,驱使接力器进行动作。因而,在主配压阀管道充油开始到越过搭叠量的中间过程中尽管有控制信号输入,但接力器仍保持静止不动状态,不起调节作用,此区域即为随动系统中存在的死区非线性表现特征。

## 3 水电机组一次调频数学模型与仿真验证

### 3.1 调速器控制模型

各电站水轮机调速器多数采用调节器与随动系统的结构模式。调节器数学模型由其控制规律所决定。随动系统包含诸多非线性因素,对系统动静态特性影响较大。为准确反映随动系统特性,建模时必须将一系列非线性因素及导叶分段关闭特性等考虑在内。本文建立的调速器控制模型见图 1。

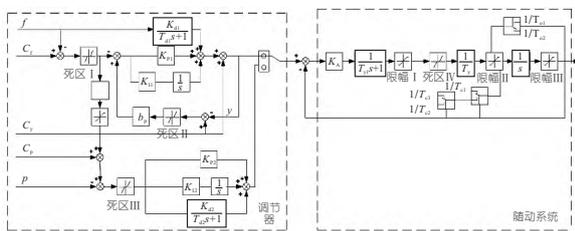


图 1 调速器控制模型

Fig. 1 Governor control model

图 1 中,  $f$  为机组频率;  $C_f$  为频率给定; 死区 I 为频率死区;  $C_y$  为开度给定;  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$ 、 $K_{d1}$  分别为开度模式下比例增益、积分增益、微分增益;  $T_{d1}$  为开度模式下微分衰减时间常数;  $b_p$  为永态转差系数; 死区 II 为开度死区;  $p$  为机组功率;  $C_p$  为功率给定; 死区 III 为功率死区;  $K_{p2}$ 、 $K_{i2}$ 、 $K_{d2}$  分别为功率模式下比例增益、积分增益、微分增益;  $T_{d2}$  为功率模式下微分衰减时间常数;  $e_p$  为调差率;  $K_A$  为综合放大器放大倍数;  $T_{y1}$  为电液转换环节时间常数;  $s$  为拉氏算子; 限幅 I 为主配压阀限幅; 死区 IV 为随动系统死区;  $T_y$  为接力器反应时间常数; 限幅 II 为接力器速度限幅; 限幅 III 为接力器行程限幅; 对于随动系统不同的开关闭特性, 分别以不同开启速度  $1/T_{o1}$ 、 $1/T_{o2}$  及不同的关闭速度  $1/T_{c1}$ 、 $1/T_{c2}$ 、 $1/T_{c3}$  等整定接力器开关闭速

度,实现分段开启与关闭。

### 3.2 被控制对象数学模型

#### 3.2.1 水轮机及引水系统模型

引水系统采用刚性水击模型进行描述,其传递函数  $G(\cdot)$  为:

$$G(h/q) = -T_w s \tag{1}$$

式中,  $h$  为水头;  $q$  为流量;  $T_w$  为水流惯性时间常数,在一定程度上反映了水击强度;  $s$  为拉氏算子。

针对水轮机,基于模型综合特性曲线与飞逸特性曲线等外特性曲线,建立外特性水轮机模型来描述水轮机流量特性与力矩特性随转速、导叶开度的动态变化关系,见图 2。

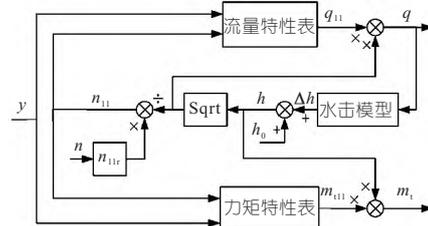


图 2 外特性水轮机模型

Fig. 2 External characteristic turbine model

图 2 中,  $y$  为随动系统输出的导叶开度;  $n$  为机组转速;  $n_{11}$  为单位转速;  $n_{11r}$  为额定单位转速;  $q$  为机组流量;  $q_{11}$  为单位流量;  $h$  为水头;  $m_t$  为机组输出力矩;  $m_{11}$  为额定单位力矩。

#### 3.2.2 发电机模型

考虑到一次调频动态性能研究仅受发电机转速变化过程影响,将发电机作为旋转刚体考虑即可满足仿真计算精度要求,发电机采用一阶模型描述,传递函数为:

$$G(s) = 1/(T_a s + e_n) \tag{2}$$

其中

$$e_n = e_g - e_x$$

式中,  $T_a$  为机组惯性时间常数;  $e_g$  为发电机电力矩对转速的偏导数;  $e_x$  为水轮机力矩对转速的偏导数。

### 3.3 一次调频仿真验证

以某大型混流式电站为例,按真机数据设置调节系统各环节。依据电站提供的实际一次调频数据进行仿真验证,分别验证开度模式与功率模式下一次调频动态特性。理论上,在开度模式下,调速器以开度控制为目标,主要考虑开度变化曲线的吻合度;在功率模式下,以功率控制为目标,主要考虑功率变化曲线的吻合度。依据仿真计算结果绘制导叶开度变化曲线与功率响应过程曲线对比,见图 3。

由图 3 可知,开度模式下仿真开度与实测开度、功率模式下仿真功率与实测功率响应变化过

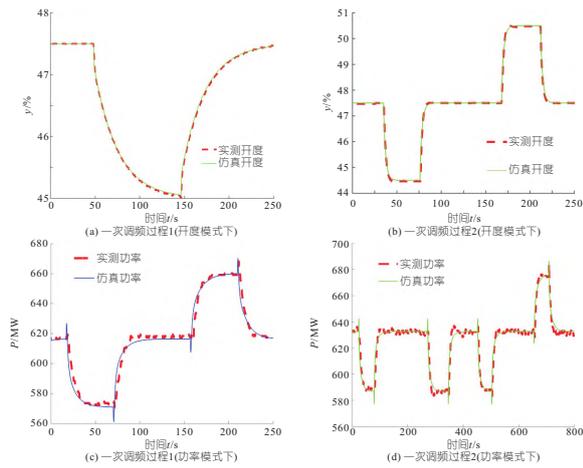


图 3 一次调频仿真

Fig. 3 Simulation of primary frequency modulation

程度高度吻合,因而所建模型能够高度准确反映机组开度模式与功率模式下一次调频的真实特性。

### 4 死区对一次调频的影响分析

基于机组一次调频数学模型,探究调节系统各类死区对一次调频动态性能的影响。调速器PID参数始终不变,初始条件中频率死区为0.05 Hz,开度死区、功率死区、随动系统死区均设为0,分别给定大频差( $\Delta f = 0.15$  Hz)和小频差( $\Delta f = 0.06$  Hz)两种阶跃扰动,见图4。

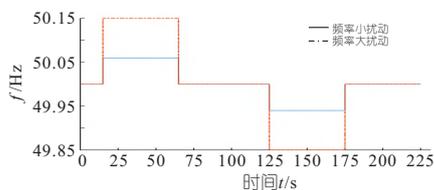


图 4 频率扰动曲线

Fig. 4 Frequency disturbance curve

#### 4.1 频率死区对一次调频的影响

频率死区的大小影响一次调频的起始频差,此处仅探究频率大扰动下频率死区对一次调频的影响。调速器处于开度模式,分别对频率死区为0/0.03/0.05/0.07 Hz进行仿真计算。在不同频率死区下的机组有功功率响应曲线见图5。

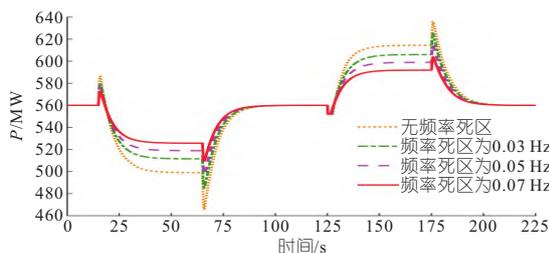


图 5 大频差时不同频率死区下的有功功率响应曲线

Fig. 5 Active power response curve under different frequency dead zones in case of large frequency difference

由图5可知,有功功率调节量随死区增大而减小,可认为频率死区不仅决定着一次调频的起始点,同时影响着一次调频的深度。

依据大频差下机组有功功率响应过程,进一步计算分析频率死区对一次调频滞后时间、响应时间、有功功率响应比、积分电量贡献率、反调功率等性能指标的影响见图6。

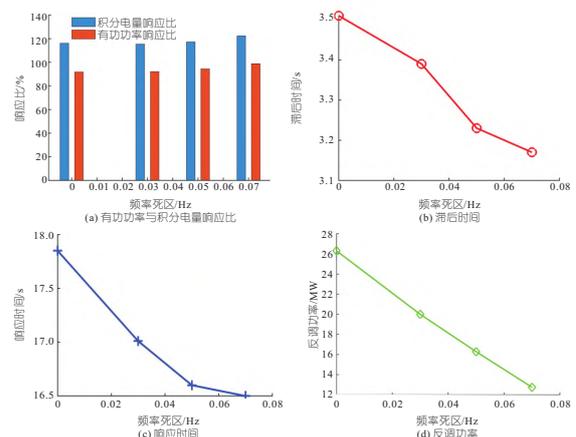


图 6 性能指标随频率死区变化关系

Fig. 6 Performance indexes changing with frequency dead zones

由图6(a)可知,有功功率响应比及积分电量贡献率随死区增大而略微增大;由图6(b)、(c)可知,随着死区增大,一次调频滞后时间在3.5~3.1 s区间,响应时间在18.0~16.5 s区间呈逐步减小趋势,因而频率死区有利于加快一次调频响应的速动性;由图6(d)可知,一次调频响应初期的反调功率随死区增大由26.31 MW降至12.74 MW,显著减小,有利于削弱对机组的危害。

#### 4.2 开度死区对一次调频的影响

调速器处于开度模式,分别给定大、小频率扰动,依次对开度死区为0/3%/5%/7%进行仿真计算。在不同频率扰动、不同开度死区下的机组有功功率响应曲线见图7。

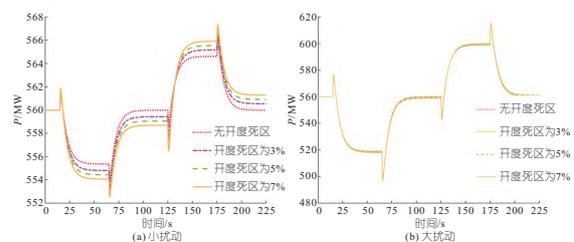


图 7 不同开度死区下的有功功率响应曲线

Fig. 7 Active power response curve under different opening dead zones

由图7可知,系统受小频差作用扰动时,开度死区的存在会导致扰动消失后功率稳定值与初始值存在偏差,开度死区越大偏差值越大;但在大频

差扰动下该现象不明显。因而可认为,若开度死区设置不当,易造成机组一次调频后频率大幅度偏离额定值,造成一次调频效果不好。

依据大频差下机组有功功率响应过程,进一步计算分析开度死区对一次调频滞后时间、响应时间、有功功率响应比、积分电量贡献率、反调功率等性能指标的影响见图 8。

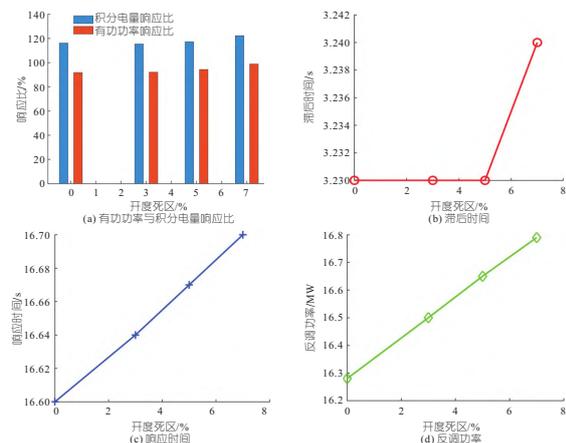


图 8 性能指标随开度死区变化关系

Fig. 8 Performance indexes changing with opening dead zones

由图 8(a)可知,有功功率响应比及积分电量贡献率随死区增大而略微增大,有利于获得较大的贡献电量与功率调节量;由图 8(b)、(c)可知,随着死区增大,一次调频滞后时间基本维持在 3.23 s 不变,响应时间由 16.6 s 逐渐增至 16.7 s,因而开度死区对一次调频响应速动性基本无影响;由图 8(d)可知,一次调频响应初期的反调功率随死区增大由 16.28 MW 增至 16.79 MW,开度死区的存在会增强反调对机组的危害。

### 4.3 功率死区对一次调频的影响

调速器处于功率模式,分别给定大、小频率扰动,依次对功率死区为 0/3%/5%/7% 进行仿真计算。在不同频率扰动、不同功率死区下的机组有功功率响应曲线见图 9。

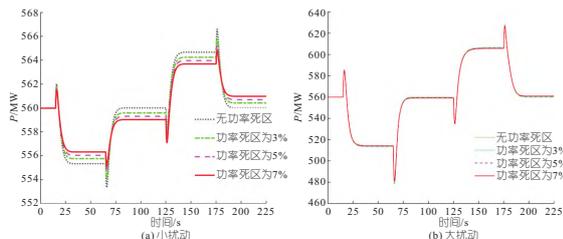


图 9 不同功率死区下的有功功率响应曲线

Fig. 9 Active power response curve under different power dead zones

由图 9 可知,系统受小频差作用扰动时,功率死区的存在会导致扰动消失后功率稳定值与初始

值存在偏差,功率死区越大偏差值越大;但在大频差扰动下该现象不明显。因而可认为,若功率死区设置不当,易造成机组一次调频后频率大幅偏离额定值,难以发挥良好的一次调频作用。

依据大频差下机组有功功率响应过程,进一步计算分析频率死区对一次调频滞后时间、响应时间、有功功率响应比、积分电量贡献率、反调功率等性能指标的影响见图 10。

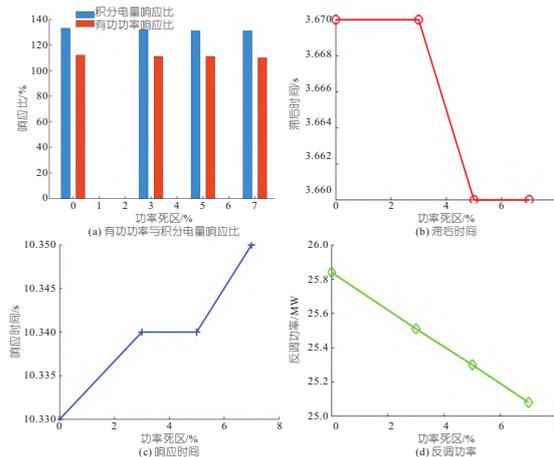


图 10 性能指标随功率死区变化关系

Fig. 10 Performance indexes changing with power dead zones

由图 10(a)可知,有功功率响应比及积分电量贡献率随死区增大而略微减小,会降低机组的一次调频贡献电量与功率调节量;由图 10(b)、(c)可知,随着死区增大,一次调频滞后时间、响应时间基本维持不变,因而功率死区对一次调频响应速动性基本无影响;由图 10(d)可知,一次调频响应初期的反调功率随死区增大由 25.84 MW 降至 25.08 MW,略微减小,有利于削弱反调对机组的危害。

### 4.4 随动系统死区对一次调频的影响

调速器处于开度模式,分别给定大、小频率扰动,小扰动下依次设置开度死区为 0/1%/2%/4%,大扰动下依次设置开度死区为 0/3%/7%/12%/15%/18%,仿真计算在不同频率扰动、不同随动系统死区下的机组有功功率响应曲线见图 11。

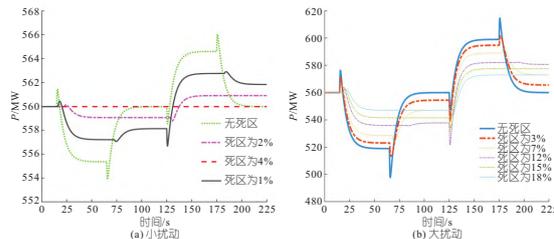


图 11 不同随动系统死区下的有功功率响应曲线

Fig. 11 Active power response curve under different servo dead zones

由图 11 可知,随动死区的存在会导致扰动消失后功率稳定值与初始值存在偏差,随动死区越大偏差值越大,频率难以回到额定值,机组难以发挥良好的一次调频性能。且在受小频差扰动时,易出现一次调频不动作的情况,因而水电机组一次调频不动作,可能是随动死区的存在所导致。

依据大频差下机组有功功率响应过程,进一步计算分析频率死区对一次调频滞后时间、响应时间、有功功率响应比、积分电量贡献率、反调功率等性能指标的影响见图 12。

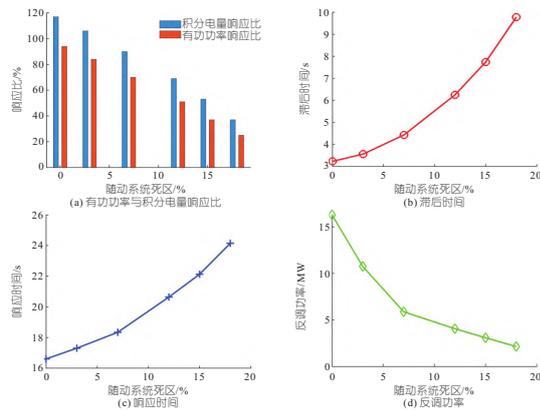


图 12 性能指标随随动系统死区变化关系

Fig. 12 Performance indexes changing with servo dead zones

由图 12(a)可知,有功功率响应比及积分电量贡献率随死区增大而大幅度减小,因而随动系统死区的存在会显著减小机组功率调节量,削弱机组贡献电量,易导致出现不合格的情况;由图 12(b)、(c)可知,随着死区增大,一次调频滞后时间由 3.23 s 增至 9.78 s,响应时间由 16.60 s 增至 24.15 s,严重恶化了一次调频响应的速动性;由图 12(d)可知,一次调频响应初期的反调功率随死区增大由 16.29 MW 降至 2.14 MW,显著减小,有利于抑制有害反调。

## 5 结论

频率死区影响一次调频起始点与调节深度,有利于抑制反调;开度死区、功率死区的存在对贡献电量、功率响应比、响应速动性几乎无影响,但会弱化一次调频效果;而随动系统死区虽有利于抑制反调,但对积分电量贡献率、功率调节量、响应速动性等均存在不利影响,会严重恶化机组一次调频性能导致被考核,易导致小频差下一次调频不动作。

### 参考文献:

- [1] MARIJA ILIC. Power system restructuring: engineering and economics[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] 苏寅生. 南方电网近年来的功率振荡事件分析[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 54-57.
- [3] 唐戢群, 刘昌玉, 何雪松, 等. 水电机组孤网运行频率振荡及其抑制研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(4): 131-134.
- [4] 黄自明, 彭国辉, 张西兰. 三板溪电厂一次调频考核情况及应对策略研究[J]. 低碳世界, 2021, 11(6): 204-205.
- [5] 张新华. 网调电厂“两个细则”考核情况分析 & 对策[Z]. 长沙: 五凌电力有限公司, 2021.
- [6] 刘春晓, 张俊峰, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的机理分析与仿真[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 29-34.
- [7] 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.
- [8] 范成围. 水火电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.
- [9] 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.

## Analysis of Influence of Dead Zone of Regulating System on Dynamic Performance of Primary Frequency Modulation

WEI Jia-da<sup>1,2</sup>, ZHAO Xun-xin<sup>1,2</sup>, MO Fan<sup>1,2</sup>, CHENG Yuan-chu<sup>3</sup>, YANG Rui-lin<sup>1,2</sup>

(1. Hydropower Industry Innovation Center of State Power Investment Corporation Limited, Changsha 410000, China;

2. Hunan Wuling Power Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China;

3. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The primary frequency modulation function of the hydropower unit plays an increasingly important role in maintaining the safe and stable operation of the power grid, and it is necessary to ensure that the units integrated into the power grid have good primary frequency modulation performance. The influence of various dead zone nonlinear factors in the hydraulic turbine adjustment system on the dynamic performance of primary frequency modulation cannot be ignored. The nonlinearity of the dead zone in all links of the adjustment system is comprehensively analyzed. Based on the established high-precision primary frequency modulation model of hydropower units, the influence of frequency dead zone, openness dead zone, power dead zone and dead zone of the follow-up system on the performance of the primary frequency modulation response performance of large and small frequency difference is explored, and it is emphasized that the next frequency modulation inaction of small disturbances may be related to the dead zone of the follow-up system, which provides important theoretical guidance for the improvement and optimization of the primary frequency modulation function of the hydropower unit.

**Key words:** hydraulic turbine governing system; primary frequency regulation; dead zone; mathematical model; dynamic performance