

引用格式:王嘉伟,章德,谢宇峥,等.考虑水轮机调速死区和限幅优化的超低频振荡控制方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):68-79.

Citation: WANG Jiawei, ZHANG De, XIE Yuzheng, et al. Ultra-low frequency oscillation control method considering dead zone and limiting optimization of hydraulic turbine governor[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 68-79.

考虑水轮机调速死区和限幅优化的超低频 频率振荡控制方法

王嘉伟^{1,3}, 章 德², 谢宇峥^{1,3}, 薛安成⁴

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410004; 3. 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410007; 4. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘 要:水轮机的调速死区及其限幅对超低频振荡特性的影响较大,甚至可导致大扰动下的正阻尼系统振荡。现有的超低频振荡的控制方法主要是优化水轮机调速器的比例积分微分控制(proportional-integral-derivative control, PID)参数,提高系统阻尼。但该方法未同时考虑死区和限幅参数。该文提出一种考虑水轮机调速死区和限幅优化的超低频振荡控制方法。首先,在含死区和限幅的非光滑单机水电系统中,分析死区和限幅参与的持续等幅振荡的形成原因与相关参数的影响,得到控制参数优化的定性需求;其次,建立包含非光滑部分的抑制效应、光滑部分的放大效应、一次调频性能的综合评价指标;再次,基于粒子群算法求解优化参数,给出了所提方法的具体应用案例;最后,分别在单机系统、四机两区域系统和某大电网的仿真系统中,将该方法与未考虑死区和限幅优化的控制方法进行对比,证明所提方法具有更好的一次调频性能和抗扰动性。

关 键 词:死区;限幅;超低频振荡;控制;一次调频

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.008 **中图分类号:** TM712 **文章编号:** 1673-9140(2025)02-0068-12

Ultra-low frequency oscillation control method considering dead zone and limiting optimization of hydraulic turbine governor

WANG Jiawei^{1,3}, ZHANG De², XIE Yuzheng^{1,3}, XUE Ancheng⁴

(1. Economic Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory, Energy Internet Supply and Demand Operation, Changsha 410007, China; 4. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The dead zone and limiting of a hydraulic turbine governor have a great influence on the characteristics of the ultra-low frequency oscillations (ULFOs), which can even lead to the oscillation of the positive damping system under large disturbance. However, the existing control methods for ULFOs mainly focus on optimizing proportional-integral-derivative (PID) control parameters of hydraulic turbine governors to improve system damping, without considering the dead zone and limiting parameters concurrently. This paper proposes a ULFO control method considering the dead zone and limiting optimization of the turbine governor and verifies its effectiveness and superiority. Firstly, in a non-smooth single hydro-generator power system (SHPS) with dead zone and limiting, the causes of continuous oscillation with constant amplitude involving dead zone and limiting are analyzed, and the influence of relevant parameters is analyzed, obtaining the qualitative demand for control parameter optimization. Then, a comprehensive evaluation index including the suppression effect of the non-smooth part, the amplification effect of the

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-08-26

基金项目: 湖南省科技创新平台与人才计划(2019TP1053), 国网湖南省电力有限公司专业咨询项目(B616A2240008)

通信作者: 薛安成(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事模型和数据驱动的新能源电力系统稳定性分析和控制方面的研究; E-mail: axue@ncepu.edu.cn

smooth part, and the performance of the primary frequency regulation is established. Additionally, the optimization parameters are solved using a particle swarm optimization algorithm, and a specific application case of the proposed method is presented. Finally, the proposed method is compared with the control method that does not consider dead zone and limiting optimization, in three simulation systems: SHPS, a four-machine two-area system, and a large-scale power grid model. The proposed method shows improved performance in primary frequency regulation and resistance to disturbance.

Key words: dead zone; limiting; ultra-low frequency oscillation; control; primary frequency regulation

在国内外水电高占比的送端电网中,与水轮机调速器相关的超低频段的频率振荡现象频繁出现,其振荡频率低于0.1 Hz,该频率比传统的低频振荡频率更低,故称之为超低频振荡^[1-5]。

目前,一些学者在超低频振荡的控制方法方面进行了研究。文献[6-9]通过优化水轮机调速器的控制参数,增大系统阻尼,从多级频率控制角度研究如何抑制振荡的发生。基于优化的比例积分微分控制(proportional-integral-derivative control, PID)参数,文献[10-11]给调速器配置了2套不同的调节模式(大网参数和孤网参数),取得较好的控制效果。文献[12-14]基于相位补偿原理,提出了设计调速器附加阻尼控制器(governor power system stabilizer, GPSS)及其参数整定的方法。文献[15-17]从阻尼转矩角度证明了设置合理的直流频率限制控制器(frequency limit controller, FLC)参数可以向系统提供正阻尼,从而抵消水电机组调速器提供的负阻尼,实现对超低频振荡的控制。

这些控制方法主要通过改善系统阻尼来控制超低频振荡。但值得注意的是,水轮机的调速死区和限幅非光滑切换环节对超低频振荡的特性也存在较大影响^[18-19]。在系统正阻尼^[20-22]且不存在平衡点^[23]时,系统也可能存在死区和限幅参与的等幅振荡(对应为非光滑动力系统的切换型振荡^[3]),该等幅振荡与系统的局部阻尼性质并无直接关系。然而,现有研究对死区与限幅非光滑结构参数、调速常规控制参数等对振荡特性的内在关联影响还未完全明确。

对于死区和限幅参与的切换型超低频振荡的控制方法,文献[24]提出了一种基于时域状态的空间稳定性分析新方法,但有关振荡抑制方法仍只考虑了常规控制参数(未考虑死区和限幅非光滑结构参数)。文献[25-27]提出了增大水电机组的调速器死区,以抑制超低频振荡的发生的方法。目前,仍鲜见对死区具体增大多少、死区增大对一次调频性能的影响的研究。

有鉴于此,本文研究含死区和限幅的非光滑单机系统中持续的等幅振荡(切换型振荡)的形成原因,从减弱振荡发生条件出发,兼顾系统稳定性和一次调频性能,提出同时考虑水轮机调速死区和限幅优化的超低频振荡控制方法;并在单机系统、改造后的四机两区域系统和某大电网中验证所提方法的有效性和优越性(更好的一次调频性能和抗扰动性)。

1 切换型超低频频率振荡控制的需求分析

为深入了解死区和限幅参与的持续等幅振荡(即切换型超低频频率振荡)的形成原因,本文将分析各类参数对振荡的影响,定性地提出切换型超低频振荡控制的需求。

1.1 非光滑系统持续的等幅振荡原因分析

超低频振荡主要与水轮机的调速系统有关,单机带负荷系统是分析的最简单模型^[28-29]。忽略励磁,仅考虑调速部分的非光滑单机水电系统的频域模型如图1所示。

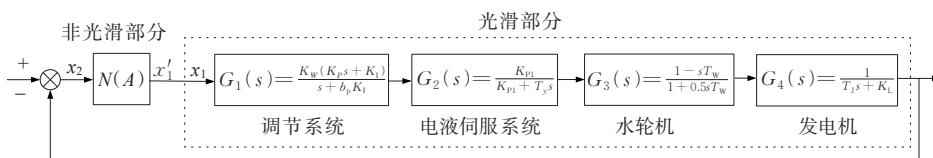


图1 单机水电系统的频域模型

Figure 1 Frequency domain model of single hydro-generator power system

在图1中,频域模型可分为光滑部分和非光滑2部分。其中,光滑部分由调节系统、电液伺服系统、

水轮机和发电机的传递函数组成, s 为频率;在调节系统的传递函数 $G_1(s)$ 中的 K_w 、 K_p 、 K_i 、 b_p 分别为频

率偏差放大倍数、PID控制模块中比例、积分环节的放大倍数和永态转差系数;电液伺服系统的传递函数 $G_2(s)$ 中的 K_{P1} 、 T_y 分别为电液转换模块的放大倍数、接力器时间常数;水轮机的传递函数 $G_3(s)$ 中的 T_w 为水锤效应时间常数;发电机的传递函数 $G_4(s)$ 中的 T_J 、 K_L 分别为发电机转动惯量、负荷的单位调节功率。非光滑部分为一次调频的死区和限幅环节,其示意如图2所示。

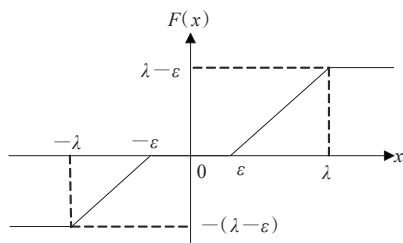


图2 死区和限幅环节

Figure 2 Dead zone and limiting stage

在图2中, x 为频率偏差的负值,也是死区与限幅函数的自变量; $F(x)$ 为死区和限幅的输出; ϵ 和 λ 分别为死区和限幅的大小。

根据描述函数法,死区和限幅非光滑部分的频域描述 $N(A)$ 可表示为^[30]

$$N(A) = \begin{cases} 0, & A \leq \epsilon \\ \frac{2}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\epsilon}{A} - \frac{\epsilon}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon}{A} \right)^2} \right], & \epsilon < A \leq \lambda \\ \frac{2}{\pi} \left[\arcsin \frac{\lambda}{A} - \arcsin \frac{\epsilon}{A} + \frac{\lambda}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{A} \right)^2} - \frac{\epsilon}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon}{A} \right)^2} \right], & A > \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中, A 为输入信号的振荡幅值。

在图1中,当某振荡模态出现后,根据 $N(A)$,可求得非光滑部分(死区和限幅部分)对该模态的放大或缩小系数,继而以新的幅值作为各光滑部分(各调节器部分)的输入,以此方式在闭环反馈系统中循环迭代。

在非光滑部分出口处,某振荡模式为

$$x_1 = A_1 \sin(\omega_s t + \varphi_1) \quad (2)$$

式中, A_1 、 ω_s 和 φ_1 分别代表振荡的幅值、频率和相位; t 为时间; x_1 为图1中的内部变量,代表死区与限幅非光滑部分的输出变量,也是光滑调节部分的输

入变量。

此振荡经过闭环系统反馈后,重新得到非光滑部分传递函数的输入信号,即

$$\begin{cases} |x_2| = |G_0(j\omega_s)| A_1 \\ \angle x_2 = \angle G_0(j\omega_s) + \pi + \varphi_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $G_0(j\omega_s)$ 为所有光滑部分传递函数的乘积; x_2 为图1中的内部变量,代表频率偏差的负值,是死区与限幅非光滑部分的输入变量。

该输入信号经过非光滑部分传递函数后,得到的新的输出信号为

$$\begin{cases} |x'_1| = |G_0(j\omega_s)| \cdot |N(A)| A_1 \\ \angle x'_1 = \angle G_0(j\omega_s) + \pi + \varphi_1 + \varphi_{N(A)} \end{cases} \quad (4)$$

式中, x'_1 为光滑部分的输入变量; $\varphi_{N(A)}$ 为非光滑部分传递函数 $N(A)$ 的相角。

当等幅振荡发生时, $x'_1 = x_1$,由此可得死区和限幅参与的等幅振荡(即切换型振荡)发生的频域判据,即

$$\begin{cases} |G_0(j\omega)| \cdot |N(A)| = 1 \\ \angle G_0(j\omega) + \angle N(A) = (2n+1)\pi \end{cases} \quad (5)$$

在一般情况下,若系统满足式(5)的第1式时,会有非光滑部分 $|N(A)| < 1$,而光滑部分 $|G_0(j\omega)| > 1$ 的情况出现(文1.2将对其具体分析),即当非光滑部分传递函数对振荡信号的抑制效应与光滑部分传递函数对振荡信号的放大效应同时发生时,振荡可能自保持,形成死区和限幅共同参与的持续等幅振荡(即切换型振荡);否则,振荡幅值将逐渐衰减到零,或逐渐发散到无穷大。

同时,式(5)的第2式亦表明,持续等幅振荡的发生,不仅要满足幅值增益条件,还要满足相位条件。

1.2 控制参数的影响分析

对于图1所示的单机水电系统,各环节变量的实验参数取值如下: $K_w=1.1$, $K_p=5$, $K_i=1$, $K_{P1}=40$, $b_p=0.03$, $T_y=13.86$ s, $T_J=10$ s, $K_L=1.5$, $T_w=1.6$ s, $\epsilon=0.0008$ Hz, $\lambda=0.0308$ Hz。在其他参数不变时,分别分析死区 ϵ 、限幅 λ 、比例参数 K_p 、积分参数 K_i 对切换型振荡的影响。

1.2.1 死区的影响分析

由于死区和限幅非光滑部分的描述函数 $N(A)$ (式1)仅是输入振幅 A 的函数,其与振荡频率 ω 无关;且 $N(A)$ 是实数,相当于其相位固定为0 rad。故在分析死区和限幅的影响时,仅关注非光滑部分传

递函数的幅值增益 $|N(A)|$ 。

根据式(1),死区和限幅非光滑部分的描述函数 $N(A)$ 具有分段特性,即

1) 情形1: $A \leq \epsilon$ 。

在该情形下,死区和限幅均不作用, $N(A)=0$,不满足发生切换型振荡的条件(式5)。

2) 情形2: $\epsilon < A \leq \lambda$ 。

在该情形下,仅死区参与作用,非光滑部分的描述函数 $N(A)$ 为

$$N(A) = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\epsilon}{A} - \frac{\epsilon}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon}{A} \right)^2} \right] \quad (6)$$

当死区 ϵ 的大小发生变化时,在不同的输入振幅 A 下,死区对非光滑部分的增益 $|N(A)|$ 的变化如图3所示。

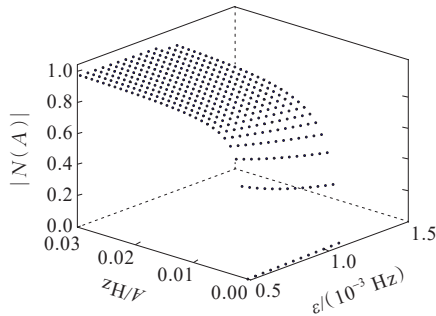


图3 死区对非光滑部分增益的影响(情形2)

Figure 3 Effect of dead zone on non-smooth part gain (Case 2)

从图3中可以看出,当死区 ϵ 的大小发生变化时, $|N(A)|$ 始终小于1,表明仅死区作用的非光滑部分对振荡信号始终起的是抑制效应;当死区 ϵ 不变时,输入振幅 A 越大, $|N(A)|$ 越大,非光滑部分的抑制效应越弱;当输入振幅远大于死区 ϵ 时,死区环节基本无变化;当输入振幅 A 不变时,死区 ϵ 越大, $|N(A)|$ 越小,非光滑部分的抑制效应越强。

综上所述, A 与 $|N(A)|$ 呈正相关, ϵ 与 $|N(A)|$ 呈负相关。当光滑部分增益 $|G_0(j\omega)|$ 不变时,发生切换型振荡对应的非光滑部分增益 $|N(A)|$ 也不变。若死区 ϵ 增大,则对应的输入振幅 A 也将增大。

根据文献[31-32],当输入振幅 A 在范围内(即死区和限幅描述函数的第2段特性),其满足发生切换型振荡的条件(式5)时,输入振幅 A 反映了系统能承受的临界扰动大小。因此,增大死区增强了非光滑部分的抑制效应,也增大了非光滑系统能承受的临界扰动幅度,在一定程度上避免了切换型振荡的发生。

3) 情形3: $A > \lambda$ 。

在该情形下,死区和限幅均参与作用,非光滑部分的描述函数 $N(A)$ 为

$$N(A) = \frac{2}{\pi} \left[\arcsin \frac{\lambda}{A} - \arcsin \frac{\epsilon}{A} + \frac{\lambda}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{A} \right)^2} - \frac{\epsilon}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon}{A} \right)^2} \right] \quad (7)$$

当死区 ϵ 的大小发生变化时,在不同的输入振幅 A 下,死区对非光滑部分的增益 $|N(A)|$ 的影响如图4所示。

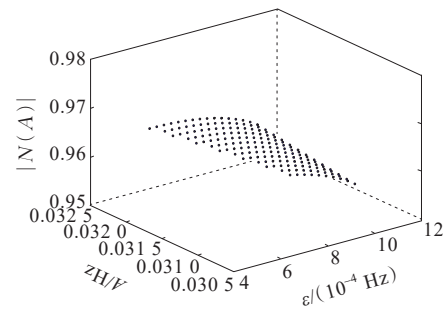


图4 死区对非光滑部分增益的影响(情形3)

Figure 4 Effect of dead zone on non-smooth part gain (Case 3)

从图4中可以看出,当死区 ϵ 的大小发生变化时, $|N(A)|$ 始终小于1,表明死区和限幅作用的非光滑部分对振荡信号始终起的是抑制效应,且由于限幅参与作用,非光滑部分的抑制效应更强(相较于图3,相同输入振幅 A 下, $|N(A)|$ 更小);当死区 ϵ 不变时,输入振幅 A 越大, $|N(A)|$ 越小,非光滑部分的抑制效应越强;当输入振幅 A 不变时,死区 ϵ 越大, $|N(A)|$ 越小,非光滑部分的抑制效应越强。

综上所述, A 和 ϵ 均与 $|N(A)|$ 呈负相关。当光滑部分增益 $|G_0(j\omega)|$ 不变时,发生切换型振荡对应的非光滑部分增益 $|N(A)|$ 也不变。若死区 ϵ 增大,则对应的输入振幅 A 减小。

根据文献[22],当输入振幅 A 在范围内(即死区和限幅描述函数的第3段特性),其满足发生切换型振荡的条件(式5)时,输入振幅 A 反映了切换型振荡的幅值大小。因此,增大死区,能减小切换型振荡的幅值。

1.2.2 限幅的影响分析

当限幅参与作用时,对应的是非光滑部分描述函数的第3段特性,即式(7)。当限幅 λ 的大小变化

时,在不同的输入振幅 $A(A > \lambda)$ 下,限幅对非光滑部分的增益 $|N(A)|$ 的影响如图5所示。

从图5中可以看出,当限幅 λ 的大小变化时, $|N(A)|$ 始终小于1,表明非光滑部分对振荡信号始终起的是抑制效应;当限幅 λ 不变时,输入振幅 A 越大, $|N(A)|$ 越小,非光滑部分的抑制效应越强;当输入振幅 A 不变时,限幅 λ 越大, $|N(A)|$ 越大,非光滑部分的抑制效应越弱。

综上所述, A 与 $|N(A)|$ 呈负相关, λ 与 $|N(A)|$ 呈正相关。当光滑部分增益 $|G_0(j\omega)|$ 不变时,发生切换型振荡对应的非光滑部分增益 $|N(A)|$ 也不变,若限幅 λ 增大,则对应的输入振幅 A 也增大。因此,为减小振荡时的幅值,应当减小其限幅。

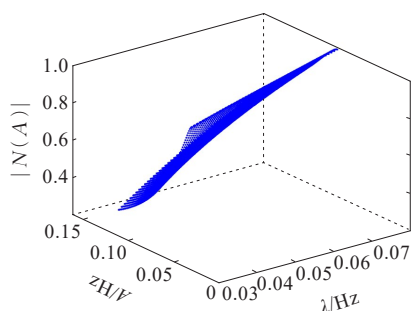


图5 限幅对非光滑部分增益的影响

Figure 5 Effect of limiting on non-smooth part gain

1.2.3 比例参数 K_P 的影响分析

光滑部分的传递函数 $G_0(j\omega)$ 是频率 ω 的函数,其与输入振幅 A 无关;但频率 ω 除受幅值增益约束外,还受相位约束(式5)。故在分析光滑部分的参数影响时,应先根据相位约束求出振荡频率,再分析光滑部分的增益大小 $|G_0(j\omega)|$ 。

根据该思路,可求得当一次调频PI环节的比例参数 K_P 变化时,对应振荡频率的 $|G_0(j\omega)|$ 的变化情况,具体结果如图6所示。

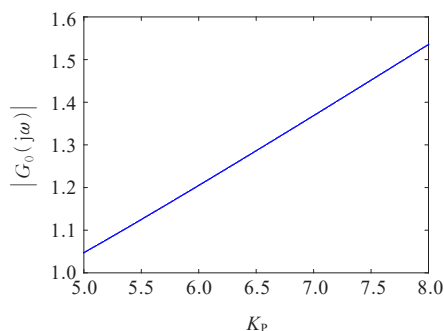


图6 K_P 对光滑部分增益的影响

Figure 6 Effect of K_P on smooth part gain

从图6中可以看出,当比例参数 K_P 变化时,在对应的振荡频率下, $|G_0(j\omega)|$ 始终大于1,表明光滑部分对振荡信号始终起的是放大效应;比例参数 K_P 越大, $|G_0(j\omega)|$ 越大,光滑部分的放大效应越强。

综上所述,当比例参数 K_P 增大时,发生切换型振荡时的 $|G_0(j\omega)|$ 增大,非光滑部分的 $|N(A)|$ 减小,即仅死区作用(第2段特性)的输入振幅 A 减小(对应承受的临界扰动减小)、死区和限幅作用(第3段特性)的输入振幅 A 增大(对应切换型振荡的幅值增大)。因此,为了增大系统能承受的扰动大小(减小)振荡时的幅值,应当减小比例参数 K_P 。

进一步地,当 $K_P < 5$ 时,式(5)无解,即无振荡频率 ω 和振幅 A 能同时满足切换型振荡的幅值增益和相位条件。当 $K_P < 5$ 时,在满足相位条件的“振荡频率 ω ”附近,光滑部分的 $|G_0(j\omega)|$ 增益情况如图7所示。

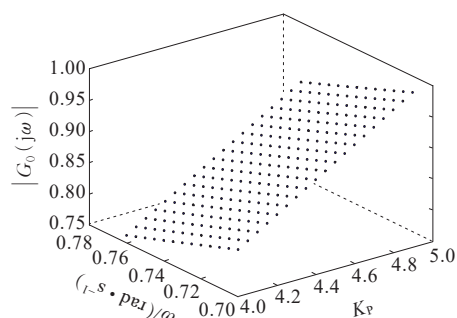


图7 $K_P < 5$ 时的光滑部分增益

Figure 7 Smooth part gain when $K_P < 5$

从图7中可以看出,当非光滑系统不发生切换型振荡时,光滑部分的增益 $|G_0(j\omega)|$ 始终小于1。即当光滑部分和非光滑部分的增益对振荡信号都是抑制效应时,系统不会发生切换型振荡。

1.2.4 积分参数 K_I 的影响分析

与文1.2.3类似,分析一次调频PI环节的积分参数 K_I 对振荡信号的影响,其具体过程不再展开。有关结论与比例参数 K_P 的影响一致,即

1) 为避免切换型振荡的发生或减小振荡时的幅值,应当减小积分参数 K_I ,即减弱光滑部分的放大效应。

2) 当积分参数 K_I 变化,使得光滑部分对振荡信号起的是抑制效应时,系统不会发生切换型振荡。

综上所述,各控制参数对系统稳定的影响见表1。

由表1可知,当发生切换型振荡时,非光滑部分

(死区和限幅部分)对振荡信号起的是抑制效应,光滑部分(各调节器部分)起的是放大效应;为避免切换型振荡的发生(增加系统承受的临界扰动大小),减小振荡时的幅值,可考虑增大非光滑部分的抑制效应、减小光滑部分的放大效应,即增大死区、减小限幅、减小一次调频PI环节的比例参数 K_P 和积分参数 K_I 。

表1 控制参数对系统稳定的影响

参数	整体结果	变化规律	对应的现象
限幅 λ	若 $ N(A) < 1$, 非光滑部分始终是抑制效应	限幅越大, $ N(A) $ 越大,抑制 效应越强	限幅越大, 振幅越大
死区 ϵ		死区越大, $ N(A) $ 越小,抑制 效应越强	死区越大,系统能 承受的扰动越 大,振幅越小
K_P/K_I	若 $ G_0(j\omega) > 1$, 光滑部分始终是放大效应 若 K_P 与 K_I 的变化 使得 $ G_0(j\omega) < 1$, 系统不会发生 切换型振荡	K_P 与 K_I 越大, $ G_0(j\omega) $ 越大, 放大效应越强	K_P/K_I 越大,系统能 承受的扰动越 小,振幅越大

2 考虑死区和限幅优化的控制方法

基于切换型超低频率振荡控制的需求分析结果,兼顾系统稳定性和一次调频性能,考虑调速死区和限幅优化的控制方法:先分别建立包含非光滑部分的抑制效应指标(频域指标)、光滑部分的放大效应指标(频域指标)和一次调频性能指标(时域指标);再基于构成的综合评价指标,求解最优的控制参数(死区和限幅参数、PI环节控制参数)。

2.1 非光滑部分的评价指标

在某一组控制参数下,将非光滑部分的评价指标 J_1 定义为非光滑部分的输入振幅在死区和限幅之间的幅值增益和,即

$$J_1 = \sum_{i=1}^m |N(A_i)| \quad (8)$$

式中, m 为离散化后的振幅点数; $m=(A_{\max}-A_{\min})/\Delta A$,取最小振幅 $A_{\min}=\epsilon$ 、最大振幅 $A_{\max}=\lambda$ 、振幅差值 $\Delta A=(\lambda-\epsilon)/10$ 。 J_1 越小,非光滑部分的抑制效应越强越好。

2.2 光滑部分的评价指标

某一组控制参数下,将光滑部分的评价指标 J_2

定义为超低频段频率范围内,光滑部分的幅值增益和,即

$$J_2 = \sum_{i=1}^n |G_0(2\pi j f)| \quad (9)$$

式中, f 为频率; n 为离散化后的频率点数; $n=(f_{\max}-f_{\min})/\Delta f$,考虑超低频段的频率范围,取最大频率 $f_{\max}=0.1$ Hz、最小频率 $f_{\min}=0.01$ Hz、频率差值 $\Delta f=0.001$ Hz。

J_2 越小,光滑部分的放大效应越好。

2.3 一次调频性能的评价指标

《水力发电机组一次调频技术要求及试验导则》(DLT 2194—2020)将一次调频性能的评价指标 J_3 定义为在频差阶跃试验中,一次调频功率响应的上升时间 T_{up} 、稳定时间 T_s 、反调功率 P_f 、阶跃功率 P_s 的加权和,其计算式为

$$J_3 = k_1 T_{up} + k_2 T_s + k_3 P_f + k_4 P_s \quad (10)$$

式中,上升时间 T_{up} 为从阶跃加入开始,到被控量变化至90%阶跃量(被控量的最终稳态值与初始值之差)所需时间;稳定时间 T_s 为从阶跃加入开始到被控量达到最终稳态值所经历的时间;反调功率 P_f 为反调功率;阶跃功率 P_s 为功率的最终稳态值与初始值之差; k_1 为上升时间权重系数; k_2 为稳定时间权重系数; k_3 为反调功率权重系数; k_4 为阶跃功率权重系数。

为满足系统频率振荡风险的抑制需求,可适当降低一次调频的性能要求。将可接受的功率响应上升时间最大值 T_{upmax} 和稳定时间最大值 T_{smax} 分别设置为30、70 s。此外,有功功率反调量 P_f 不应超过功率调节量的30%。当功率响应时间或反调量超过该最大值时,将该评价指标值设置为无穷大。为保证功率的有效支撑,阶跃功率 P_s 越大越好。在计算时,取其值为 $1/P_s$ 。 J_3 越小,一次调频性能越好。

2.4 综合评价指标

将同时满足切换型超低频振荡控制和一次调频性能的调速器控制参数优化的综合目标函数 J 定义为

$$J = k_5 J_1 + k_6 J_2 + k_7 J_3 \quad (11)$$

式中, k_5 、 k_6 、 k_7 分别为非光滑部分的评价指标、光滑部分的评价指标、一次调频性能的评价指标的权重系数。

根据这些定义,考虑死区和限幅优化的控制方法为,求解优化的控制参数,使得综合目标函数(式11)最小。其中,优化控制参数的求解,本文选用粒子群优化算法^[5]。

3 不同控制方法的应用案例

本文以实际电网某振荡关键水电机组的参数为例,给出了所提优化方法和已有优化方法的具体应用案例。优化前的原始参数设置:死区 $\epsilon=0.001$ Hz, 限幅 $\lambda=0.011$ Hz; $K_p=9$, $K_i=8$, $K_{pi}=10$, $b_p=0.03$, $T_y=14.37$ s, $T_w=1.1$ s, $K_w=1.46$, $T_j=9$ s, $K_L=1.5$ 。

3.1 考虑死区和限幅的本文优化方法

根据实际电网设置和《水力发电机组一次调频技术要求及试验导则》(DL/T 2194—2020)要求,死区的优化参数范围为 0.000 6~0.002 0, 限幅参数的优化范围为 0.004~0.010; PI 环节的优化参数 K_p 范围为 2~10; K_i 的范围为 1~5。

设置频差阶跃为 0.105 Hz 的试验,将各评价指标的结果进行归一化,并在相应的指标权重下计算综合评价指标结果。指标权重选取的原则:将系统的稳定性设为最为重要(即超低频频率振荡的控制);将一次调频上升时间、稳定时间、反调功率等设为同等重要;将一次调频的阶跃功率设为相对重要。

当粒子群优化算法的最大计算次数为 500 时,得到在某一组指标权重下的控制参数优化结果,具体见表 2。

表 2 控制参数的优化结果

Table 2 Optimization results of control parameters

各评价指标分量的权重						
J_1	J_2	上升 时间	稳定 时间	反调 功率	阶跃 功率	优化结果
4	4	1	1	1	2	$\epsilon=0.0018$ Hz, $\lambda=0.0058$ Hz, $K_p=2.57$, $K_i=3.32$

在表 2 所示的优化参数下,绘制非光滑部分的抑制效应和光滑部分的放大效应的原始参数与优化参数的对比曲线,结果分别如图 8、9 所示。

从图 8、9 中可以看出,优化后非光滑部分的抑制效应增强,光滑部分的放大效应减弱,有利于非光滑单机系统的稳定。

进一步地,在不同工况(不同机组出力 and 不同水头)下,设置频差阶跃为 0.105 Hz 的试验,对参数优化后系统的一次调频性能进行比较。在不同工况下,优化后系统的一次调频功率响应曲线分别如图 10、11 所示。

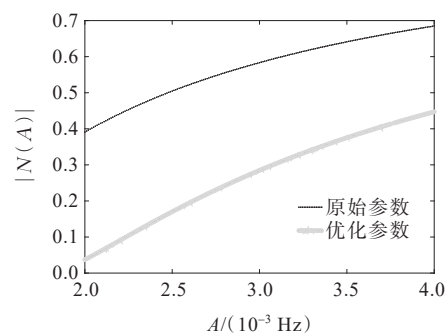


图 8 非光滑部分的抑制效应对比

Figure 8 Comparison of inhibition effects of non-smooth part

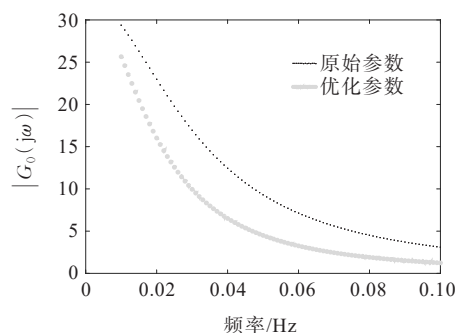


图 9 光滑部分的放大效应对比

Figure 9 Comparison of amplification effect of smooth part

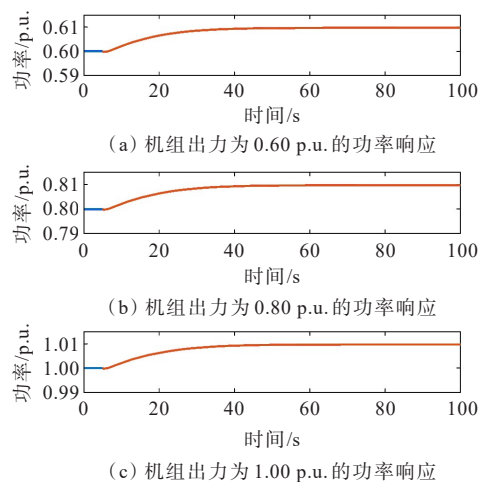


图 10 不同机组出力下的功率响应

Figure 10 Power response under different unit outputs

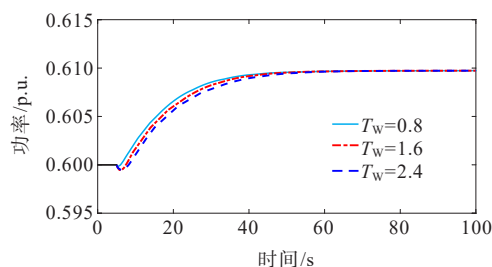


图 11 不同水头下的功率响应

Figure 11 Power response under different T_w

从图10、11中可以看出,在系统的控制参数优化后,在不同工况(不同机组出力和不同水头)下,一次调频性能均满足要求。

3.2 不考虑死区和限幅的已有优化方法

调速器控制参数的已有优化方法(仅改变调速器的PI参数,不改变死区和限幅)的综合评价指标为包含阻尼水平的频域性能指标和一次调频性能的时域指标两种。

已有优化方法^[5]将反映控制超低频率振荡能力的阻尼水平指标函数 J_* 定义为

$$J_* = \sum_{i=1}^m D(f_i) \quad (12)$$

$$D(f_i) = \begin{cases} |D_m(f_i)|, & D_m(f_i) \leq 0 \\ \frac{1}{D_m(f_i)}, & D_m(f_i) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, f_i 为第 i 个频率; m 为离散化后的频率点数; $m = (f_{\max} - f_{\min}) / \Delta f$,考虑超低频段的频率范围,取 $f_{\max} = 0.100 \text{ Hz}$, $f_{\min} = 0.010 \text{ Hz}$, $\Delta f = 0.001 \text{ Hz}$; $D_m(f_i)$ 为对应频率下的阻尼转矩分量。

将一次调频性能的时域指标设置为与本文所提优化方法(文2.1.3)的时域指标一致。阻尼指标权重和调频性能指标权重比设置为8:1(阻尼指标对应系统稳定性,将其权重设置为非光滑部分的评价指标和光滑部分的评价指标权重之和)。类似地,基于粒子群算法得到的已有方法的优化参数分别为 $K_p=2, K_i=2.99$ 。

4 不同控制方法的性能比较

本节分别在单机系统、改造的四机两区域系统、某大电网的仿真系统中,将水轮机调速器参数分别设置为原始参数、不考虑死区和限幅的已有优化方法参数、考虑死区和限幅的本文优化方法参数,通过扰动下系统的动态性能对比,验证本文所提方法的有效性和优越性。

4.1 单机系统中的比较

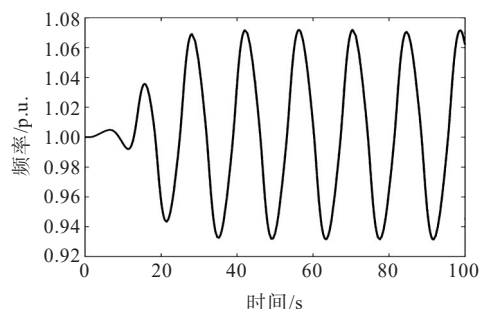
4.1.1 情形1

在小扰动下,原始参数系统发生振荡,已有优化参数和本文优化参数系统都稳定,但本文优化方法的调频性能更好。

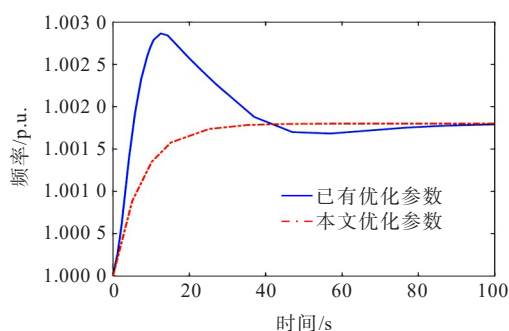
在图1所示的单机水电系统中,设置0.090 Hz的频差阶跃扰动仿真试验。在该试验中,当调速器控制参数取不同值时,系统的频率变化对比如图12所示。从图12中可以看出,原始参数系统在频差阶

跃扰动下,会发生约0.069 2 Hz的超低频振荡;而优化后的系统都能恢复稳定,但本文所提优化方法的调频性能更好。

在0.050~0.100 Hz的频差阶跃扰动(小扰动)下,试验也得到了类似的结论。



(a) 原始参数



(b) 已有优化参数与本文优化参数

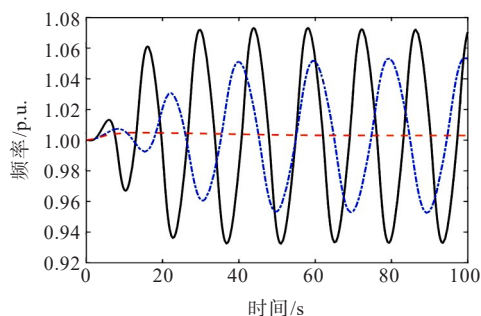
图12 不同调速参数下的频率变化(情形1)

Figure 12 Frequency variation under different governor parameters (case 1)

4.1.2 情形2

在大扰动下,原始参数和已有优化参数系统发生振荡,但本文优化参数系统仍能恢复稳定。

在图1所示的单机水电系统中,设置0.15 Hz的频差阶跃扰动仿真试验,调速器控制参数取不同值时,系统的频率变化对比如图13所示。



—原始参数 --已有优化参数 -.-本文优化参数

图13 不同调速参数下的频率变化(情形2)

Figure 13 Frequency variation under different governor parameters (case 2)

从图 13 中可以看出,原始参数和已有优化参数系统在较大的频差阶跃扰动下,均会发生超低频振荡;而本文所提优化方法仍能使系统恢复稳定。

在 0.100~0.165 Hz 的频差阶跃扰动(大扰动)下,仿真试验也得到了类似的结论,即本文所提方法优化后的系统能承受更大的扰动。这进一步验证了该方法的优越性。

4.2 四机两区域系统中的比较

将传统的四机两区域系统改造为存在超低频振荡风险的高水电占比系统,改造后的系统如图 14 所示。

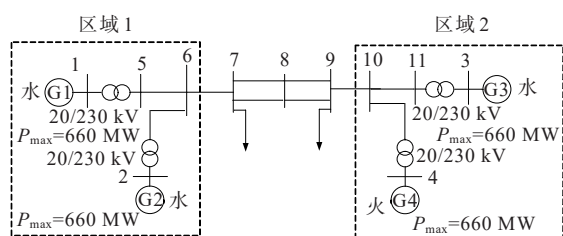


图 14 改造后的四机两区域系统模型

Figure 14 Modified model of four-machine two-area system

在图 14 中,发电机 1~3 均为水轮发电机,其均配备完整的励磁、调速系统、电力系统稳定器,其相关参数与实际电网某振荡关键水电机组的保持一致;发电机 4 为火电机组,其相关参数与实际电网某火电机组的保持一致。

在改造后的四机两区域系统中,设置母线 7、8 之间的回线 1 发生三相瞬时性短路故障,当水轮发电机 1~3 的调速系统参数分别为原始参数、已有优化参数、本文优化参数时,系统的频率变化对比如图 15 所示。

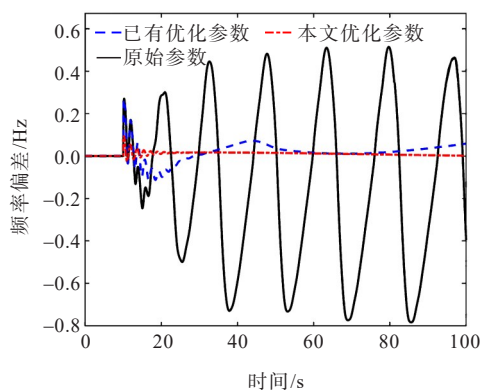


图 15 不同参数配置下的频率变化

Figure 15 Frequency variation under different parameter configurations

从图 15 中可以看出,原始参数下的四机两区域系统在故障后会发生超低频振荡;而在本文方法获得的优化参数下,系统能恢复稳定,且其调节控制效果比已有方法(不优化死区和限幅)的控制效果更好。

4.3 某大电网仿真系统中的比较

某大电网的网内负荷相对较小,且水电占比高,该电网是典型的大规模水电外送系统。在该仿真系统中,设置某交流外送的重要通道发生三相永久短路跳双回线故障,当关键水电机组的调速器参数分别取原始参数、已有优化参数、本文优化参数时,该系统的频率变化如图 16 所示。

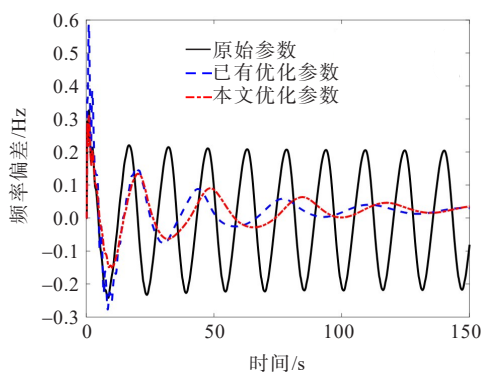


图 16 大电网不同调速参数下的频率变化

Figure 16 Frequency variation of large-scale power grid under different governor parameters

从图 16 中可以看出,在大扰动下,原始参数电网会发生超低频振荡,而优化后电网均能恢复稳定。与已有优化方法相比,本文优化方法能减小扰动后的第一摆的振荡幅值,更有利于电网的安全和稳定。

5 结语

本文提出了一种同时考虑水轮机调速死区和限幅优化的超低频振荡控制方法,该方法兼顾了系统稳定性和一次调频性能,仿真试验验证了其有效性和优越性,主要结论如下:

1) 在非光滑系统中,当非光滑部分(死区和限幅部分)对振荡信号的抑制效应与光滑部分(各调节器部分)对振荡信号的放大效应相同时,则可能发生持续的等幅振荡(即切换型振荡)。

2) 为控制死区和限幅参与的切换型超低频振荡,需要增大非光滑部分的抑制效应、减小光滑部分的放大效应。即增大死区、减小限幅、减小一次

调频PI环节的比例参数和积分参数。

3) 本文所提优化方法的综合评价指标包含了非光滑部分的抑制效应、光滑部分的放大效应、一次调频性能。仿真试验表明,与传统方法不考虑死区和限幅优化相比,本文所提优化方法的调频性能更好且优化后的系统能承受更大的扰动。

值得注意的是,若将单机系统求解的调速优化参数直接应用于实际大电网中,可能会面临一定的局限性,需考虑进一步整体优化或配合其他的辅助频率控制措施。

参考文献:

- [1] 毕悦,方思瑞,于舒祺.含光伏并网的弱交流系统低频振荡协调控制策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):59-65.
BI Yue, FANG Sirui, YU Shuqi. Coordinated control strategy for low frequency oscillations of weak AC grid connected PV systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(4):59-65.
- [2] VILLEGAS PICO H, MCCALLEY J D, ANGEL A, et al. Analysis of very low frequency oscillations in hydro-dominant power systems using multi-unit modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(4):1906-1915.
- [3] 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.
- [4] 张鑫宇,薛峰,李碧君,等.双馈风场串补系统次同步振荡紧急控制策略[J].电力工程技术,2023,42(5):108-116.
ZHANG Xinyu, XUE Feng, LI Bijun, et al. Emergency control strategy for subsynchronous oscillation of DFIG-based wind farms with a series-compensated line[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(5):108-116.
- [5] 赵文广,李云丰,文涛.风电柔直并网虚拟阻抗次同步振荡抑制策略[J].电网与清洁能源,2024,40(6):137-144+154.
ZHAO Wenguang, LI Yunfeng, WEN Tao. The virtual damping control strategy of flexible HVDC connecting to PMSGBased wind farm for sub-synchronous resonance suppression[J]. Power System and Clean Energy,2024,40(6):137-144+154.
- [6] 马晓伟,魏平,王吉利,等.抑制超低频振荡的水电多级频率控制参数优化[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):126-132.
MA Xiaowei, WEI Ping, WANG Jili, et al. Optimization of multi-stage frequency control parameters of hydro power unit for ultra-low frequency oscillation suppression[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):126-132.
- [7] 史华勃,陈刚,丁理杰,等.兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的水轮机调速器PID参数优化[J].电网技术,2019,43(1):221-226.
SHI Huabo, CHEN Gang, DING Lijie, et al. PID parameter optimization of hydro turbine governor considering the primary frequency regulation performance and ultra-low frequency oscillation suppression[J]. Power System Technology,2019,43(1):221-226.
- [8] 杨桂兴,郭小龙,孙谊嫔,等.虚拟同步发电机频率偏差前馈阻尼控制策略的参数整定方法[J].高压电器,2024,60(10):46-53.
YANG Guixing, GUO Xiaolong, SUN Yiqian, et al. Parameter tuning method of frequency deviation feedforward based damping control strategy for virtual synchronous generator[J]. High Voltage Apparatus,2024,60(10):46-53.
- [9] 阮睿,朱清,郭登辉,等.基于迁移学习的风电并网系统次/超同步振荡紧急切机策略[J].智慧电力,2024,52(11):23-31.
RUAN Rui, ZHU Qing, GUO Denghui, et al. Emergency tripping strategy for sub/supersynchronous oscillation in wind power integrated system based on transfer learning [J]. Smart Power,2024,52(11):23-31.
- [10] 王官宏,于钊,张怡,等.电力系统超低频频率振荡模式排查及分析[J].电网技术,2016,40(8):2324-2330.
WANG Guan hong, YU Zhao, ZHANG Yi, et al. Troubleshooting and analysis of ultra-low frequency oscillation mode in power system[J]. Power System Technology,2016,40(8):2324-2330.
- [11] 苗长新,赵文鹏,刘家明,等.基于频率超前校正的VSG并联系统有功振荡抑制策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(15):24-35.
MIAO Changxin, ZHAO Wenpeng, LIU Jiaming, et al. Active power oscillation suppression strategy for VSG parallel systems based on frequency leading correction [J]. Power System Protection and Control,2024,52(15):24-35.
- [12] 张建新,施鑫磊,陈刚,等.水电机组调速器附加阻尼控制仿真试验[J].南方电网技术,2019,13(11):24-28.

- ZHANG Jianxin, SHI Xinlei, CHEN Gang, et al. Simulation test on additional damping control of hydropower unit governor[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(11): 24-28.
- [13] 许昊, 甘德强, 黄润, 等. 基于最小特征轨迹的电力系统稳定器参数整定方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 134-143.
- XU Hao, GAN Deqiang, HUANG Run, et al. Parameter tuning method for power system stabilizer based on minimum characteristic locus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 134-143.
- [14] 游奕弘, 谢懿晗, 张华赢, 等. 基于 APF 模式切换的高频谐振有源阻尼镇流策略[J]. 供用电, 2023, 40(10): 10-18.
- YOU Yihong, XIE Yihan, ZHANG Huaying, et al. APF mode switching based active damping stabilization strategy for high-frequency resonance[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(10): 10-18.
- [15] 刘程卓, 王渝红, 王彪, 等. 基于系统暂态能量函数及直流灵敏度排序的多直流调制协调策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6295-6304+6491.
- LIU Chengzhuo, WANG Yuhong, WANG Biao, et al. Multi-HVDC modulations coordination based on DC sensitivity sequence and system transient energy function [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6295-6304+6491.
- [16] 王菲, 刘建琴, 韩丰, 等. 应用直流调制改善水电能源基地交流电网运行特性[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3911-3916.
- WANG Fei, LIU Jianqin, HAN Feng, et al. Application of DC modulation to improving operation characteristics of hydropower base grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3911-3916.
- [17] 方健, 李辉. 基于状态重构准谐振扩张状态观测器的 LCL 型并网逆变器电流控制策略研究[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 170-179.
- FANG Jian, LI Hui. Research on current control strategy of the LCL-type grid-connected inverter based on state reconfiguration with quasi resonant-extended state observer[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 170-179.
- [18] 薛安成, 王嘉伟, 刘晓博, 等. 简化单机水电系统负阻尼时频率振荡的类 Hopf 非光滑分岔分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5103-5113.
- XUE Ancheng, WANG Jiawei, LIU Xiaobo, et al. Hopf-like non-smooth bifurcation analysis of frequency oscillation in simplified single hydropower generator system with negative damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5103-5113.
- [19] 王嘉伟, 熊鸿韬, 杨滢, 等. 基于波波夫谐波线性化的简化水电系统切换型频率振荡的近似分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7019-7028.
- WANG Jiawei, XIONG Hongtao, YANG Ying, et al. Approximation of switching-type frequency oscillation in the simplified hydropower system based on popov harmonic linearization[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7019-7028.
- [20] XUE A C, WANG J W, ZHENG C, et al. On the mechanism and control for the ultra-low frequency oscillation in NY Power Grid with large-scale hydropower[J]. Control Theory and Technology, 2019, 17(3): 241-251.
- [21] 薛安成, 王嘉伟. 基于非光滑分岔的单机水电系统超低频频率振荡机理分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1489-1497.
- XUE Ancheng, WANG Jiawei. Mechanism analysis of ultra-low frequency oscillation of single hydropower system based on non-smooth bifurcation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1489-1497.
- [22] 赵牧驰, 汪海蛟, 刘纯, 等. 汽轮机发电机组宽频带阻抗建模及次/超同步振荡分析[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 238-246.
- ZHAO Muchi, WANG Haijiao, LIU Chun, et al. Broadband impedance modeling and sub/super-synchronous oscillation analysis of steam turbine generator[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 238-246.
- [23] 薛安成, 王嘉伟. 含增强型死区的电力系统超低频频率振荡的非光滑分岔分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2725-2734.
- XUE Ancheng, WANG Jiawei. Non-smooth bifurcation analysis of ultra-low frequency oscillations in power systems with enhanced dead zone[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2725-2734.
- [24] 汪芳宗, 余坤, 李默. 一种水电机调速系统稳定性分析方法及超低频振荡抑制[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-9 [2024-01-03]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232187>.
- WANG Fangzong, YU Kun, LI Mo. Stability analysis method of speed regulation system of hydropower unit and ultra-low frequency oscillation suppression[J/OL]. China Industrial Economics, 1-9 [2024-01-03]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232187>.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 陈磊, 路晓敏, 陈亦平, 等. 多机系统超低频振荡分析与等值方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 10-15+25.
- CHEN Lei, LU Xiaomin, CHEN Yiping, et al. Analysis of ultra-low-frequency oscillations in multi-machine system and equivalent method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 10-15+25.
- [29] 陈平, 杜文娟. 基于新能源下混合风电场不同类型风机动态特性相似环节引起的振荡风险研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 114-124.
- CHEN Ping, DU Wenjuan. Study on the oscillation risk caused by similar dynamic characteristics of different types of wind turbines in hybrid wind farms based on new energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 114-124.
- [30] 吴麒, 王诗宓, 杜继宏, 等. 自动控制原理-上册[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- WU Qi, WANG Shimi, DU Jihong, et al. Principles of automatic control[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [31] 王嘉伟, 熊鸿韬, 刘晓博, 等. 大扰动后正阻尼单机水电系统频率振荡的近似及适应性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 145-150.
- WANG Jiawei, XIONG Hongtao, LIU Xiaobo, et al. Approximation and adaptability analysis of frequency oscillation in single hydromachine power system with positive damping after large disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 145-150.
- [32] 刘彦军, 何维, 朱东海, 等. 基于二阶VSG的变换器频率支撑能力评估及提升方法[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 102-113.
- LIU Yanjun, HE Wei, ZHU Donghai, et al. Evaluation and improving method of frequency support of converters based on second-order VSG section[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 102-113.
- [32] 刘彦军, 何维, 朱东海, 等. 基于二阶VSG的变换器频率支撑能力评估及提升方法[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 102-113.
- LIU Yanjun, HE Wei, ZHU Donghai, et al. Evaluation and improving method of frequency support of converters based on second-order VSG section[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 102-113.