

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230362

水轮机调速器不同控制模式对电网超低频振荡影响分析

何胜明¹, 张 健¹, 段贵金¹, 杨光东¹, 蔡卫江², 李桂林³

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 2. 南京南瑞水利水电科技有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 随着水电占比高的西南电网转变为特高压交直流联网结构, 电网中出现了一些超低频振荡现象。针对水电机组调速器特性, 建立水电机组小扰动模型, 采用特征值分析法, 讨论了水电机组调速器在一次调频中各个参数对系统稳定性的影响, 对功率模式和开度模式进行对比, 并分析了开度模式和功率模式与 AGC 配合的影响。结果表明, 开度模式的参数可调范围大于功率模式, 但更易受 AGC 的影响。该结果对深入研究超低频振荡的抑制方法奠定了基础。

关键词: 西南电网; 水轮机调速器; 超低频振荡; 一次调频; AGC

中图分类号: TV712

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0195-05

1 引言

西南电网“强直弱交, 异步互联”的区域电网特性显著, 水电机组占比高达 70%, 网内巨型水电机组的动态调节特性影响了电网频率稳定性, 由网内水电机组“水锤效应”带来的负阻尼效应显著, 降低了电网的稳定性, 易发生超低频振荡。其诱发原因多样, 主要与水电机组调速系统控制参数、水轮机水流惯性时间常数等相关^[1]。对此已进行了较多研究^[2-8], 然而已有研究并未具体分析水轮机调速器在开度和功率模式下对系统的稳定性影响, 以及两种模式下调速器与 AGC 相配合时所引起的超低频振荡机理。鉴此, 本文通过建立水电机组小扰动模型, 利用特征值法, 通过横向比较开度模式和功率模式, 具体分析了系统各个状态参数以及调速器模式对系统稳定性的影响; 讨论了单机单区域中一次调频与 AGC 配合产生超低频振荡的机理, 并在时域仿真模型中验证了所得结论, 对深入研究超低频振荡的抑制方法奠定了基础。

2 水电机组小扰动模型与分析方法

超低频振荡时机械功率振荡幅度较大而电磁

功率震荡幅度较小, 具体表现为机组调速系统和管道水锤效应提供负阻尼, 从而使系统频率在额定频率附近摇摆, 因此本文所建小扰动模型, 忽略死区和调速器限幅等非线性因素, 在平衡点附近对水轮机及其调速器、发电机进行线性化。一方面, 在 simulink 中搭建相应的小扰动模型, 在时域中分析系统的频率特性; 另一方面, 建立系统的空间状态方程, 通过特征值法计算系统的阻尼和频率, 从而研究系统各个参数对超低频振荡的影响。

2.1 水轮机及过水系统模型

水轮机的结构复杂, 由于水流的惯性、粘性、空化等因素, 水轮机各个参数之间是非线性的。为便于分析, 采用线性化后的标准水轮机六系数模型, 即:

$$\begin{cases} \Delta P_m = e_x \Delta x + e_y \Delta y + e_h \Delta h \\ \Delta q = e_{qx} \Delta x + e_{qy} \Delta y + e_{qh} \Delta h \end{cases} \quad (1)$$

式中, ΔP_m 为水轮机输出机械功率偏差; e_x 、 e_y 、 e_h 分别为水轮机力矩对转速、导叶开度、水头传递系数; Δx 、 Δy 、 Δh 、 Δq 分别为频率、导叶开度、水头、流量的偏差相对值; e_{qx} 、 e_{qy} 、 e_{qh} 分别为水轮机流量对转速、导叶开度、水头传递系数。

过流管道采用近似弹性水击模型, 即:

$$\Delta h / \Delta q = -T_w s / (\alpha T_r^2 + 1) \quad (2)$$

其中 $T_w = LV_0 / (gH_0)$; $T_r = 2L / a$

式中, T_w 为水流惯性时间常数; T_r 为水击相长

收稿日期: 2023-03-12, 修回日期: 2023-04-03

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2022M711017)

作者简介: 何胜明(1969-), 男, 正高级工程师, 研究方向为机电工程, E-mail: heshengming@sdic.com.cn

通讯作者: 张健(1986-), 男, 高级工程师, 研究方向为机电工程, E-mail: zhangjian@ylhdc.com.cn

时间常数； α 为管道弹性系数，取 0.125； a 为水击压力波速， $a \approx 1\ 000\ \text{m/s}$ 。

将式(2)代入式(1)中，得到水轮机状态方程为：

$$\begin{cases} \Delta \dot{h} = \Delta h_1 \\ \Delta \dot{h}_1 = [-\Delta h - T_w(e_{qy}\Delta y + e_{qx}\Delta x + e_{qh}\Delta h)]/(\alpha T_r^2) \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\Delta \dot{h}$ 为水头偏差相对值的导数； Δh_1 为中间状态量。

2.2 调速器模型

调速系统分为功率模式和开度模式。功率模式下，调速器将采集得到的机组频率偏差 Δx 与发电机输出电磁功率偏差反馈信号进行综合，通过 PI 调节后输出给液压伺服系统，液压伺服系统再通过多级液压放大，最终由主接力器控制机组导叶开度变化。开度模式下，反馈信号变为开度反馈，再输入到 PI 调节器中。调速器及液压伺服系统控制框图^[9]见图 1。图 1 中， W_p 为功率脉宽调制系数。

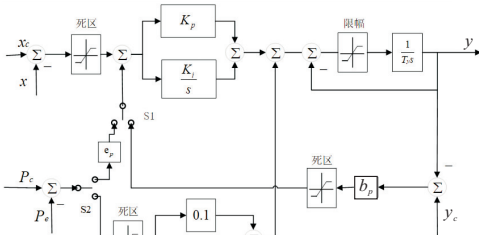


图 1 调速系统模型

Fig. 1 Model of speed control system

通过控制 S1、S2 切换调速器的工作模式。当 S2 切换到上侧，S1 切换到左侧，调速器的工作模式为功率模式；当 S1 切换到右侧，则为单机运行时的开度模式。

调速器功率模式、开度模式下，忽略限幅和死区后状态方程分别为：

$$\begin{cases} \Delta \dot{u} = (-K_i - K_i e_x e_p) \Delta x - K_i e_p e_y \Delta y - K_i e_p e_h \Delta h \\ \Delta \dot{y} = -\left(\frac{K_p}{T_y} + \frac{K_p e_p e_x}{T_y}\right) \Delta x + \frac{1}{T_y} \Delta u - \left(\frac{1}{T_y} + \frac{K_p e_y e_p}{T_y}\right) \Delta y - \frac{K_p e_p e_h}{T_y} \Delta h \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{u} = -K_i \Delta x - K_i b_p \Delta y \\ \Delta \dot{y} = -\frac{K_p}{T_y} \Delta x + \frac{1}{T_y} \Delta u - \frac{K_p b_p + 1}{T_y} \Delta y \end{cases} \quad (5)$$

2.3 发电机及负荷模型

用 T_a 表示转子转动惯量，又称为发电机惯性时间常数， e_g 表示发电机阻尼，发电机及负荷传递函数可表示为：

$$G_g = \Delta x / \Delta P_m = 1 / (T_a s + e_g) \quad (6)$$

状态方程为：

$$\Delta \dot{x} = -e_g \Delta x / T_a + \Delta P_m / T_a \quad (7)$$

2.4 区域控制误差计算模型

A_{ACE} 反映了区域电网内的发电有功功率与负荷的平衡情况，由联络线交换功率偏差及电网频率偏差两部分构成。 A_{ACE} 计算的传递函数模型为：

$$A_{ACE} = \Delta P_{tie} - 0.02B\Delta x \quad (8)$$

式中， B 为系统频率偏差系数。

系统总控制框图见图 2。

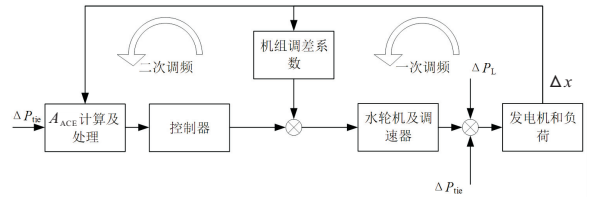


图 2 单机系统控制框图

Fig. 2 Single-machine system control block diagram

2.5 特征值分析

综合式(1)~(8)，可得系统状态方程为：

$$\Delta \dot{x} = \mathbf{A} \Delta x \quad (9)$$

式中， \mathbf{A} 为状态矩阵。

一次调频时，功率模式下，整个系统有 5 个微分方程，针对一次调频分析，应用 5 个对应的状态变量可得系统状态矩阵：

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{u} \\ \Delta \dot{y} \\ \Delta \dot{h}_1 \\ \Delta \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 & a_{15} \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta u \\ \Delta y \\ \Delta h_1 \\ \Delta h \end{bmatrix}$$

其中

$$a_{11} = e_x - e_g / T_a ; a_{13} = e_y / T_a ; a_{15} = e_h / T_a$$

调速器为功率模式时， $a_{21} = -K_i - K_i e_x e_p$ ， $a_{23} = -K_i e_p e_y$ ， $a_{25} = -K_i e_p e_h$ ， $a_{31} = -(K_p / T_y + K_p e_p e_x / T_y)$ ， $a_{32} = 1 / T_y$ ， $a_{33} = -1 / T_y - K_p e_p e_y / T_y$ ， $a_{35} = -\frac{K_p e_p e_h}{T_y}$ ， $a_{41} = -\frac{T_w}{\alpha T_r^2} (e_{qx} a_{11} + e_{qy} a_{31})$ ， $a_{42} = -\frac{T_w e_{qy} a_{32}}{\alpha T_r^2}$ ， $a_{43} = -\frac{T_w}{\alpha T_r^2} (e_{qx} a_{13} + e_{qy} a_{33})$ ， $a_{44} = -\frac{T_w e_{qh}}{\alpha T_r^2}$ ， $a_{45} = -\frac{1}{\alpha T_r^2} - \frac{T_w}{\alpha T_r^2} (e_{qx} a_{15} + e_{qy} a_{35})$ 。

调速器为开度模式时， $a_{21} = -K_i$ ， $a_{23} = -K_i b_p$ ， $a_{25} = 0$ ， $a_{31} = -K_p / T_y$ ， $a_{32} = 1 / T_y$ ， $a_{33} = -\frac{1}{T_y} - \frac{K_p b_p}{T_y}$ ， $a_{35} = 0$ ， $a_{41} = -\frac{T_w}{\alpha T_r^2} (e_{qx} a_{11} +$

$$e_{qy}a_{31}), a_{42} = -\frac{T_w e_{qy} a_{32}}{\alpha T_r^2}, a_{43} = -\frac{T_w}{\alpha T_r^2} (e_{qx} a_{13} + e_{qy} a_{33}), a_{44} = -\frac{T_w e_{qh}}{\alpha T_r^2}, a_{45} = -\frac{1}{\alpha T_r^2} - \frac{T_w e_{qx} a_{15}}{\alpha T_r^2}.$$

通过求解状态矩阵可得到特征值^[10]:

$$\lambda_i = \alpha_i + \beta_i \quad (10)$$

式中, λ_i 为矩阵特征值; α_i 、 β_i 分别为特征值实部、虚部。

根据矩阵特征根理论,当矩阵存在含非负实部的特征根时,系统阻尼为负值或处于临界阻尼,系统在受到小扰动时将发散,当系统特征根全为负实部时,阻尼为正,系统趋于稳定。系统受扰动时,其频率 f_i 、阻尼比 ξ_i 与特征根的关系为:

$$\begin{cases} f_i = \beta_i / (2\pi) \\ \xi_i = -\alpha_i / \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \end{cases} \quad (11)$$

由于阻尼比越小,系统不稳定性越强,故选择最小阻尼比作为系统稳定性的主要研究指标。可通过研究系统最小阻尼比随不同参数的变化来确定该参数对系统稳定性的影响。

为了验证上述过程的正确性,构造了该系统的时域仿真模型,在 simulink 中进行仿真。仿真时模拟机组以 80% 额定功率运转,在 1 s 时给予机组 75% 额定功率的扰动。

3 一次调频引起的超低频振荡分析

研究参数主要有功率、开度模式下的调速器控制参数 K_p 、 K_i , 接力器响应时间常数 T_y , 水流惯性时间常数 T_w , 水击相长时间常数 T_r 和发电机惯性时间常数 T_a 。

系统默认参数包括 $e_{qy} = 0.66, e_{qx} = 0.1, e_{qh} = 0.47, e_y = 0.5, e_x = -0.96, e_h = 1.45, T_w = 1.34, T_r = 0.23, T_a = 7, e_g = 1, T_y = 0.2, e_p = b_p = 0.04$ 。

3.1 调速器控制参数 K_p 、 K_i

在调速器中,参数 K_p 反映系统的偏差,其增大时,可以缩短调节时间,但会使稳定性下降。参数 K_i 反映系统偏差的累计,可以消除稳态误差。在系统中,调速器参数 K_p 、 K_i 的变化对系统阻尼比的影响体现在图 3 中。可以看出,在其他参数相同的条件下, K_p 、 K_i 增大时,系统均不稳定,表现为超低频振荡;当 K_p 、 K_i 变化时,开度模式下的稳定域更大,在电站实际一次调频调节过程中更不易出现超低频振荡。

3.2 接力器响应时间常数 T_y

调速器中的机械部件(伺服、间隙、速率限制器等)与调速器控制参数 K_p 、 K_i 共同决定了调

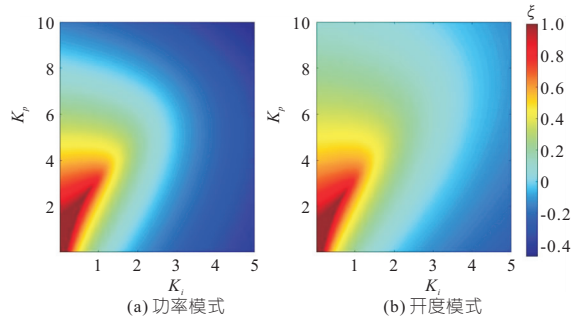


图 3 调速器控制参数 K_p 、 K_i 对系统阻尼比的影响
Fig. 3 Influence of governor control parameters K_p and K_i on system damping ratio

速器响应的快速性。其中,机械部件的参数被简化为接力器响应时间常数 T_y 。在图 4 中表示为不同 K_p 、 T_y 下系统阻尼比的变化,其中 $K_i = 1.5$ 。可以发现,当 T_y 较小时,调速器响应越快,比例系数变化对系统的影响越明显;当 T_y 逐渐增大,调速器的调节速动性下降,系统稳定性也下降。

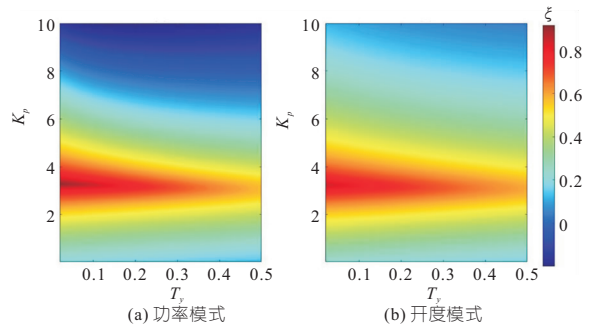


图 4 接力器响应时间常数对系统阻尼比的影响
Fig. 4 Influence of relay response time constant on system damping ratio

通过时域仿真(图 5)验证了两种模式下 T_y 对系统稳定性的影响,与特征值法的结论一致。图 5 中 f^* 为频率变化标幺值。另外,观察图 5 可知,相同控制器参数时,开度模式下系统超调量比功率模式更小,调节时间也比功率模式更短。

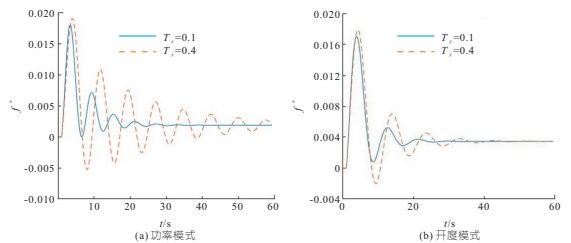


图 5 小扰动下的时域仿真($K_p = 6.5, K_i = 1.5$)
Fig. 5 Time domain simulation under small disturbance ($K_p = 6.5, K_i = 1.5$)

3.3 水流惯性时间常数 T_w 和水击相长时间常数 T_r
通常情况下, T_w 对系统稳定性不利。图 6 为不同 T_w 、 K_p 时系统阻尼比的变化。对比图 6 (a)、(b)与(c)、(d)发现 T_w 、 T_r 较小时,即管道长度较短、水头较高、流量较小时,系统稳定性较好,

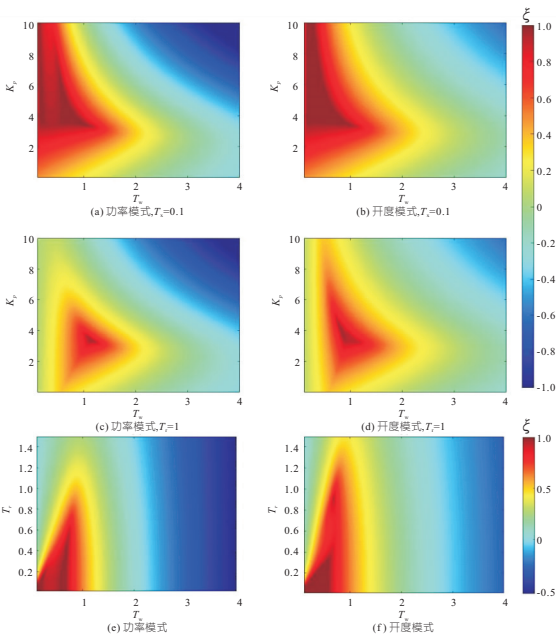


图 6 不同 T_r 、 T_w 下系统阻尼比变化

Fig. 6 System damping ratio changes under different T_r and T_w

且开度模式稳定性依旧优于功率模式。随着 T_w 、 T_r 增大,压力钢管管长增长,系统水锤效应增强,系统稳定性下降。另外,当 T_r 较大时, T_w 增大,系统阻尼比变化并非单调,会先增后减,因为此时管道长度较长,水头和流量的变化引起的水锤效应变化更明显,此时较大或较小的 T_w 都会使系统稳定性下降。观察图 6(e)、(f),发现在 T_r 增大时系统稳定性略有下降,尤其是当 T_w 较小时。但在时域仿真中, T_r 的变化对系统稳定性产生影响较小,几乎可以忽略,说明管长不直接影响系统阻尼比,而是影响水头和流速的作用效果,在系统的水锤效应中水头和流速起主导作用。

3.4 发电机惯性时间常数 T_a

电磁功率与机械功率通过发电机的转子运行方程相联系,因此需要不同发电机惯性时间常数 T_a 与接力器惯性时间常数 T_y 的耦合作用对系统阻尼比的影响。图 7 为不同 T_a 、 T_y 下系统阻尼比的变化。由图 7 可知,当 T_y 较小时, T_a 对系统的影响越明显,尤其在功率模式下影响更为明显;当 T_a 逐渐增大时,即发电机转子转动惯量越大,发电机给系统的阻尼越大,系统越稳定。

4 一次调频与 AGC 配合引起的超低频振荡分析

AGC 控制中的影响参数主要为频率偏差系数 B ,其值由上级调度机构进行具体分析和计算,

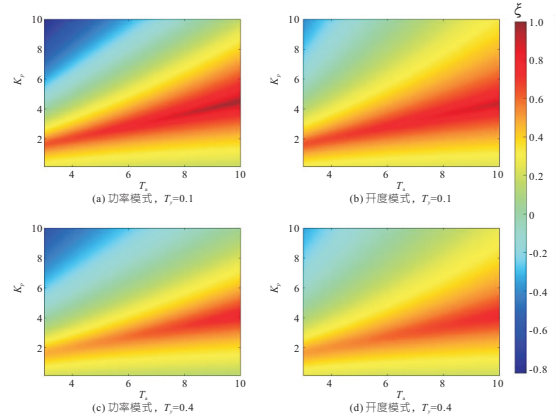


图 7 不同 T_a 、 T_y 下系统阻尼比的变化

Fig. 7 Changes of system damping ratio under different T_a and T_y

从而合理地确定 A_{ACE} 的值。本文采用图 2 所示的简化 AGC 控制模型,仅考虑定频率控制,即 $\Delta P_{tie} = 0$,实现单机系统的无差调节。将图 1 中开关 S2 切换到下侧,S1 切换到右侧,将功率监控系统接入调速器,即为与 AGC 配合下的开度模式。

求解与 AGC 配合的系统状态方程,可得到系统阻尼比随 B 、 K_p 的变化情况,见图 8(a)、(b)。结果显示,频率偏差系数对开度模式的影响更为明显,对功率模式的影响很小;当 K_p 较小时,随着 B 的增大,系统阻尼比总体逐渐减小,当 B 过大时,系统稳定性显著下降,此时二次调频的参与程度过高,造成过调,且此时经济性较差,故 B 的取值要适中。

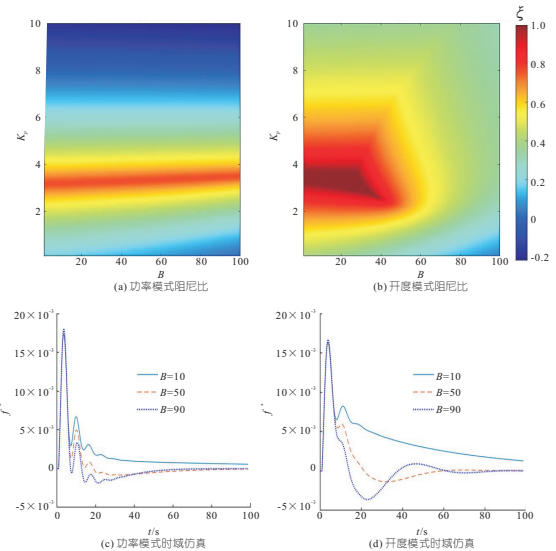


图 8 B 与 K_p 变化时系统阻尼比的变化与时域仿真
Fig. 8 Time domain simulation of system damping ratio when B and K_p change

系统时域仿真结果见图 8(c)、(d),观察可得,当 B 较小时,虽然系统稳定性较好,但由于 AGC 参与程度过低,导致系统难以回到初始频

率;当 B 过大时,系统出现过调,但调节时间减少。在开度模式下,AGC 过调更明显;另外,开度模式与 AGC 配合时,调节时间比功率模式长,但系统短时间内响应量较小。

5 结论

a. 一次调频中开度模式的稳定性优于功率模式,能适应的机组参数范围也大于功率模式。

b. 当 T_y 增大、 T_a 减小时,系统的惯性增大,速动性变差,稳定性降低。

c. 当 T_w 增大时,系统稳定性降低,但不是单调的,当 T_r 较大时会出现先升高再降低的现象;而 T_r 不直接影响系统稳定性,而是通过影响水头和流速的作用效果,从而影响系统阻尼。

d. 水力机组与 AGC 配合时, B 的变化对开度模式的影响更明显,因此在一次调频和二次调频配合时,开度模式更易产生过调,且调节时间更长。为多区域 AGC 调节与超低频振荡的机理研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王官宏,陶向宇,李文锋,等. 原动机调节系统对电

力系统动态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报,2008(34):80-86.

- [3] YANGWEIJIA,NORRLUND PER,BLADH JOHAN, et al. Hydraulic damping mechanism of low frequency oscillations in power systems: Quantitative analysis using a nonlinear model of hydropower plants [J]. Applied energy, 2018, 212: 1138-1152.
- [4] LU X,LI C,LIU D,et al. Influence of water diversion system topologies and operation scenarios on the damping characteristics of hydropower units under ultra-low frequency oscillations [J]. Energy, 2022,239.
- [5] 王鹏,刘天琪,王顺亮,等. 水电机组超低频振荡小信号模型及影响因素分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(18):5942-5955.
- [6] 卢舟鑫,涂勇,叶青. 水电机组一次调频与 AGC 协同控制改造及试验分析[J]. 水电与抽水蓄能,2020,6(2):82-86,120.
- [7] 胡翔,王春,杜继成,等. 西南电网水电机组一次调频性能与 AGC 控制策略优化[J]. 水力发电,2021,47(9):66-111,122.
- [8] 赵源筱. 含高比例可再生能源电力系统自动发电控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2021.
- [9] 何常胜,董鸿魁,翟鹏,等. 水电机组一次调频与 AGC 典型控制策略的工程分析及优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):146-151.
- [10] 冯陈. 抽水蓄能机组系统辨识与复杂工况下控制规律研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.

Analysis of Ultra-low Frequency Oscillation Mechanism of Hydraulic Turbine Governor Under Different Control Modes

HE Sheng-ming¹,ZHANG Jian¹,DUAN Gui-jin¹,YANG Guang-dong¹,CAI Wei-jiang²,LI Gui-lin³

(1. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051,China; 2. NARI Group Co., Ltd., Nanjing 211106,China; 3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100,China)

Abstract: With the transformation of the southwest power grid with a high proportion of hydropower into an UHV AC-DC network structure, ultra-low frequency oscillations have occurred in the power grid. According to the characteristics of the hydropower unit governor, a small disturbance model of the hydropower unit was established. The impact of various parameters of the hydropower unit governor on the system stability in primary frequency modulation was discussed by using the eigenvalue analysis method, and the power mode and the opening mode were compared. Finally, the impact of the opening mode and the power mode with AGC was studied. The results show that the parameter adjustable range of the opening mode is larger than that of the power mode, but it is more easily affected by AGC. This study lays a foundation for further research on suppression methods of ultra-low frequency oscillations.

Key words: Southwest China Power Grid; water turbine governor; ultra-low frequency oscillation; primary frequency modulation; AGC