

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201023

水电高占比电网中水轮机模型对频率振荡特性影响及其适应性分析

丁理杰¹, 刘姗梅², 史华勃¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川蜀能电力有限公司高新分公司, 四川 成都 610041)

摘要: 在小电网中, 频率稳定是系统暂态稳定重点关注对象之一。水电高占比时, 水轮机及其调速器模型的准确性直接影响频率稳定分析结果。针对该问题, 对比分析了采用理想模型、基于运行点变化模型、传递系数模型的电网频率动态特性。通过水电机组传递函数, 量化分析了不同水头高度及机组不同出力运行时的振荡频率和阻尼特性。通过暂态仿真, 研究了不同模型对机组不同运行点扰动后的频率的振荡特性。最后给出了适用于工程计算的水轮机仿真模型建议。

关键词: 水电高占比; 频率稳定; 水轮机模型; 线性化模型

Influence of a turbine model on frequency oscillation characteristics and its adaptability in a high hydro-ratio power grid

DING Lijie¹, LIU Shanmei², SHI Huabo¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China;

2. Sichuan Shuneng Power Co., Ltd. High-Tech Branch, Chengdu 610041, China)

Abstract: In a small power grid, frequency stability is one of the most important issues. The hydro-turbine and its speed governor model directly affect the accuracy of frequency stability results in a high hydro-ratio power grid. To examine this issue, the frequency dynamic characteristics of a power grid using ideal, operation point change and transfer coefficient models are compared and analyzed. Based on the transfer function of hydropower units, the oscillation frequency and damping characteristics of different water head and units with different output are quantitatively analyzed. Through transient simulation, the frequency oscillation characteristics of different models at different operating points of the unit are studied. Finally, some suggestions are made for a turbine simulation model suitable for engineering calculation.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905200).

Key words: high hydro-ratio; frequency stability; hydro-turbine model; linear model

0 引言

频率稳定是电力系统传统三大稳定之一。在大型互联电网仿真中, 研究最多的是系统的功角稳定性、电压稳定性^[1], 对频率稳定主要研究功率不平衡后系统稳态频率能否恢复到允许范围内, 主要关注的是系统旋转备用容量和低周高周配置合理性。随着云南鲁西背靠背直流异步联网^[2-3]、西南异步联

网^[4-5]工程建设, 学者们对水电高占比电网频率稳定性开展了较多研究, 对频率的动态振荡特性投入了更多关注^[6-11]。在水电主导的孤网频率稳定性方面, 调速器和水轮机及引水系统对系统频率振荡影响最大, 文献^[6-15]针对调速器参数开展了研究, 但对水轮机不同工作点对频率稳定性影响的研究开展不够。水轮机及其引水系统是一个复杂的非线性系统, 目前已建立了线性模型、集总参数非线性模型(俗称“非线性模型”)、分布参数非线性模型^[16-18]。在稳定工况点线性化得到的线性模型, 结构简单、易于

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905200)

计算, 适合电力系统故障后运行点不大幅变化的模拟。分参模型采用偏微分方程描述水力系统并使用综合特性曲线作为水轮机边界条件, 利用特征线法求取精确数值解, 精度高, 但计算复杂, 不适合大规模电力系统仿真。非线性模型包含水力损耗和空载损耗死区、饱和等非线性环节, 物理意义明确, 但对实测及建模^[19]也要求较高。电力系统分析中使用最广泛的是线性化模型, 简化的如水轮机理想模型, 复杂如基于模型综合特性曲线的传递系数模型^[20]。就电力系统暂态频率稳定而言, 主要关心的是扰动后几十秒内是否会产生高周低周和频率负阻尼振荡问题, 可以认为水头、流量等不发生大幅变化, 采用线性化模型能近似描述水电机组振荡过程。本文面向水电机组占主导小电网, 站在工程实用化角度, 研究机组不同运行工况(水头、流量)下, 对比采用理想模型、基于水头流量变化模型、传递系数模型的电网频率动态特性, 给出满足频率稳定计算的水轮机线性化模型选型建议。

1 典型线性化模型

1.1 理想模型

目前普遍采用的 PSASP 等电力系统分析软件在处理水轮机模型时采用的是简单的理想模型, 如式(1)。

$$\frac{P_m(s)}{Y(s)} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \quad (1)$$

式中: P_m 为水轮机输出功率; Y 为导叶开度; T_w 为额定运行点处水锤时间常数。当机组在额定点运行时, 该理想模型能较好地反应原动机特性。

1.2 基于水头流量变化模型

忽略空载流量后, 水轮机功率方程满足式(2)。

$$P_m = \eta q h \quad (2)$$

式中: η 为水轮机额定效率 η_r 为基准的标幺值; q 为额定流量; Q_r 为基准的标幺值; h 为额定水头高度; H_r 为基准的标幺值。

导叶开度、水头和流量间满足式(3)。

$$q = k_e y \sqrt{h} \quad (3)$$

式中: y 为导叶开度; k_e 为系数。

小扰动情况下, 对简单直管路且管道长度小于 600~800 m 时, 管壁及水体的弹性以及流动的摩擦阻力均可以忽略, 此时刚性水击模型满足传递函数:

$$\Delta h = -T_{w0} s \Delta q \quad (4)$$

式中, $T_{w0} = \frac{Lq}{gFh} = \frac{q}{h} T_w$ 为运行点流量 q 、水头高度 h 时的水锤时间。

对式(2)、式(3)进行线性化, 结合式(4), 可得

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta y(s)} = \eta h \sqrt{h} \frac{1 - \frac{y}{\sqrt{h}} T_{w0} s}{1 + 0.5 \frac{y}{\sqrt{h}} T_{w0} s} \quad (5)$$

在额定运行点处, 式(5)即等效为式(1)。

1.3 传递系数模型

忽略水体和管壁弹性, 基于更加严格的推导, 可得出水轮机引水系统的刚性水击模型。该模型基于某一运行点线性化, 水轮机的转矩 ΔT_m 、流量 Δq 可表示为与导叶 Δy 、水头 Δh 和转速 Δx 相关的线性方程, 如式(6)。

$$\begin{cases} \Delta T_m = e_y \Delta y + e_h \Delta h + e_x \Delta x \\ \Delta q = e_{qy} \Delta y + e_{qh} \Delta h + e_{qx} \Delta x \end{cases} \quad (6)$$

式中: e_y 、 e_h 、 e_x 分别为水轮机功率对开度、水头、转速的传递系数; e_{qy} 、 e_{qh} 、 e_{qx} 分别为流量对开度、水头、转速的传递系数。上述系数通过水轮机综合特性曲线求得^[21-22]。

忽略转速偏差系数, 或把转速带来的功率变化

归到负荷—转速里^[23], 由式(4)、式(6)得式(5)的相似化表达式为

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta y} = e_y \frac{1 + e T_{w0} s}{1 + e_{qh} T_{w0} s} \quad (7)$$

式中, $e = (e_y e_{qh} - e_h e_{qy}) / e_y$ 。

取春厂坝电站 HLD307-LJ-150 水轮机模型综合曲线, 计算不同水头、出力下的传递系数如表 1—表 3 所示。机组额定水头 130 m, 最高水头 161 m, $T_w = 2.07$ s。

表 1 水头 130 m 时各传递系数, $h = 1$

Table 1 Hydro-turbine transfer coefficients on the hydraulic head of 130 m, $h = 1$

负荷	e_y	e_x	e_h	e_{qy}	e_{qx}	e_{qh}	q_0	e
100%	0.99	-1.36	1.68	0.99	-0.36	0.68	1.00	-1.00
80%	1.11	-1.28	1.47	1.11	-0.45	0.63	0.81	-0.83
60%	1.05	-0.97	1.11	1.07	-0.35	0.49	0.63	-0.64

45%	1.14	-0.80	0.86	1.22	-0.36	0.42	0.49	-0.50
30%	0.91	-0.57	0.61	1.06	-0.28	0.33	0.38	-0.39

表 2 水头 145 m 时各传递系数, $h=1.115$
Table 2 Hydro-turbine transfer coefficients on the hydraulic head of 145m, $h=1.115$

负荷	e_y	e_x	e_h	e_{qv}	e_{qx}	e_{qh}	q_0	e
100%	1.28	-1.43	1.52	1.13	-0.40	0.60	0.87	-0.75
80%	1.28	-1.33	1.32	1.16	-0.47	0.56	0.73	-0.63
60%	1.37	-0.89	0.96	1.27	-0.25	0.39	0.58	-0.50
45%	1.16	-0.74	0.73	1.17	-0.30	0.35	0.44	-0.38
30%	0.76	-0.47	0.46	0.88	-0.21	0.25	0.32	-0.28

表 3 水头 161 m 时各传递系数, $h=1.238$
Table 3 Hydro-turbine transfer coefficients on the hydraulic head of 161 m, $h=1.238$

负荷	e_y	e_x	e_h	e_{qv}	e_{qx}	e_{qh}	q_0	e
100%	1.45	-1.64	1.46	1.20	-0.55	0.61	0.80	-0.59
80%	1.44	-1.14	1.11	1.22	-0.31	0.44	0.67	-0.49
60%	1.50	-1.01	0.88	1.34	-0.39	0.41	0.51	-0.38
45%	1.29	-0.75	0.66	1.23	-0.31	0.33	0.42	-0.31
30%	0.85	-0.49	0.44	0.92	-0.23	0.25	0.31	-0.23

2 不同运行点处的频率振荡特性

2.1 频率响应模型

水轮机调速器由控制器和执行器构成。目前最常用的控制器为并联PID控制器, 传递函数为

$$Gov(s) = k_p + k_i/s + k_d s / (1 + T_d s) \quad (8)$$

式中: k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例、积分、微分系数; T_d 为微分响应时间参数。

接力器传递函数为

$$G_h(s) = 1 / (1 + T_y s) \quad (9)$$

式中, T_y 为接力器反应时间。

当主要关注发电机频率特性时, 发电机及负荷传递函数可简化为

$$G_{en}(s) = 1 / (T_j s + e_n) \quad (10)$$

式中: T_j 为发电机惯性时间常数; e_n 为计及负荷的频率综合自调节因子。

包含调速器、接力器、水轮机、发电机及负荷的系统传递函数框图如图 1。

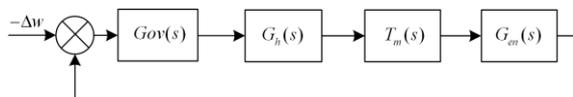


图 1 水电机组传递函数框图

Fig. 1 Transfer function diagram of hydro-turbine governing system

2.2 不同运行工况下振荡特性

四川春厂坝电厂调速系统参数取 $k_p=2$, $k_i=0.15$, $k_d=0.5$, $T_d=0.05$, $T_y=0.02$, $T_j=4.18$, $e_n=0.02$ 。由式(11)可得不同水头高度下, 机组满出力运行时水轮机及其调速系统开环传递函数的相频特性如图 2 所示。

$$\Delta T_m = -\Delta \omega Gov(s) G_h(s) G_{en}(s) = -k_d \Delta \omega + j k \Delta \omega = -k_d \Delta \omega + k_s \Delta \delta \quad (11)$$

当机组运行于 130 m 的额定水头, 在频率小于 0.1 Hz 时, 水轮机及调速系统具有正阻尼, 当水头达到 145 m 和 161 m 时, 频率可提升到 0.21 Hz 和 0.39 Hz, 如图 2 所示。水头越高, 其实部系数绝对值越大, 阻尼越强, 如图 3 所示。即相同出力下, 水头越高, 系统可提供的正阻尼频带越宽, 阻尼越强。

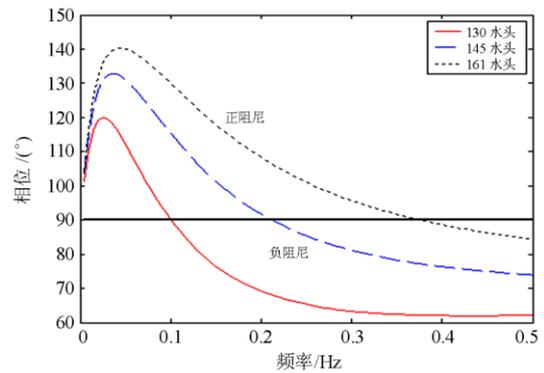


图 2 不同水头高度满出力下水轮机及调速系统相频特性
Fig. 2 Phase-frequency characteristics of speed-governing system on different hydraulic head with 100% load

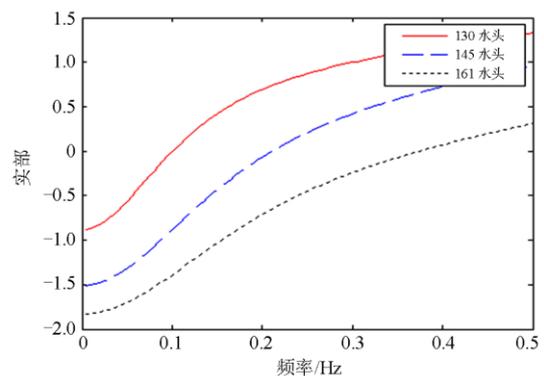


图 3 不同水头高度满出力下水轮机及调速系统实部
Fig. 3 Real part of speed-governing system on different hydraulic head with 100% load

系统的振荡频率由水轮机及调速系统和发电机特性共同决定:

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta \omega} = \frac{-Gov(s)G_h(s)}{1 + Gov(s)G_h(s)G_{en}(s)} \quad (12)$$

在不同水头下, 闭环传递函数的幅频特性如图 4 所示。在 130 m 额定水头下, 主导振荡频率 0.07 Hz, 145 m 水头下振荡频率约 0.11 Hz。即相同出力下, 水头越高, 主导振荡频率越高。

进一步比较相同水头下, 机组带不同负荷时水轮机及其调速系统的阻尼特性以及机组振荡特性。以额定水头运行为例, 机组带负荷越小, 主导振荡频率越高, 正阻尼频带越宽, 系统阻尼越强, 如图 5、图 6 所示。

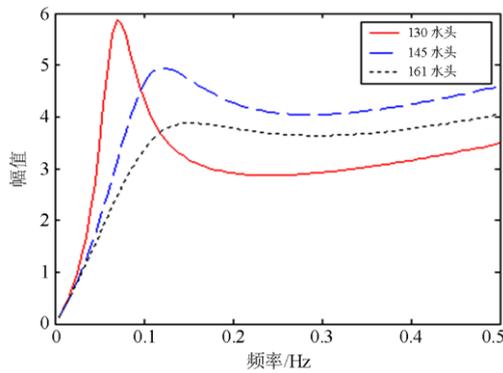


图 4 不同水头高度满出力下水电机组幅频特性

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristics of hydro-generator on different hydraulic head with 100% load

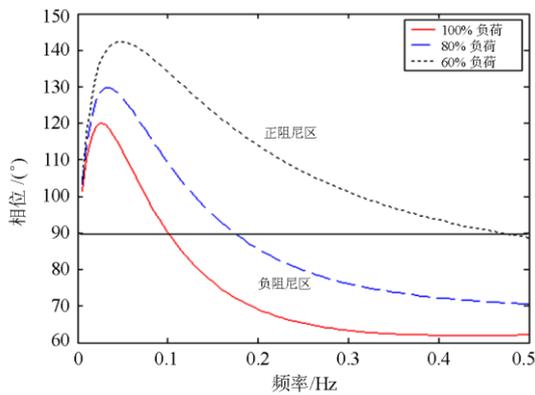


图 5 不同出力下水轮机及调速系统相频特性

Fig. 5 Phase-frequency characteristics of speed-governing system on different load rate

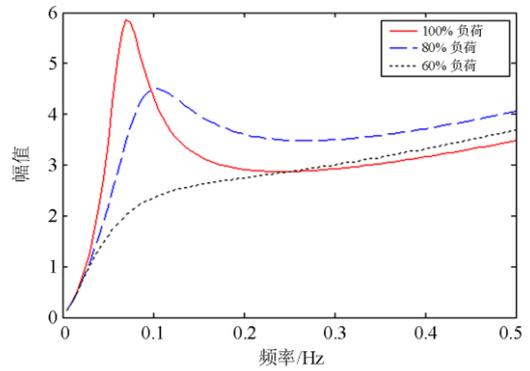


图 6 不同出力下水电机组幅频特性

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristics of hydro-generator on different load rate

综上, 在水电机组占主导的系统中, 安排机组运行于高水头, 增加水电机组开机(即降低单机负荷率, 进入正阻尼区), 可有效降低系统发生弱阻尼超低频振荡的风险。

3 不同模型下频率振荡特性仿真

3.1 理想模型不同水头下适应性

水电机组占主导的孤网系统中, 频率稳定性是系统分析的重点^[24-25]。以春厂坝电厂独立带一小区域负荷孤网运行为例开展仿真分析。扰动设置为 5 s 时电厂出线侧发生单相接地 1 s 后重合成功。

小扰动下水轮机传递系数模型的准确性已得到验证^[12,16]。如图 7 所示, 满负荷时采用理想模型和传递系数模型在 130 m 额定水头下的频率振荡曲线相似度最高, 故障后最高频率 1.12 p.u., 最低频率分别为 0.88 p.u.和 0.86 p.u.。随着水头高度偏离额定水头, 相同扰动下理想模型和传递系数模型频率振幅偏差可超 0.11 p.u.(即 5.5 Hz)以上, 仿真引起误差可以导致新能源机组、负荷等高周或低周切除, 已不适用于描述频率振荡特性。

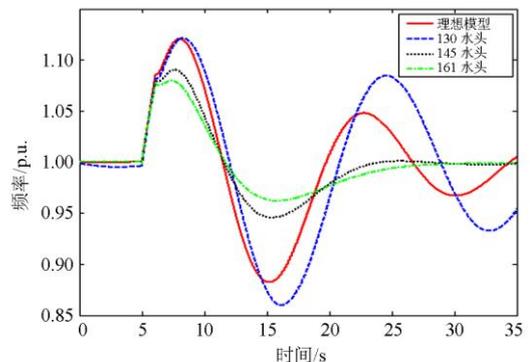


图 7 不同水头下传递系数模型和理想模型对比

Fig. 7 Comparison with the transfer coefficients model and

ideal model at different hydraulic head

3.2 不同运行工况下振荡特性比较

图8—图10反映了理想模型、基于水头流量变化模型、传递系数模型在不同水头、不同负荷率下的频率特性曲线。其中，基于水头流量变化模型中，由于用于机电暂态仿真往往仅知道发电机出力，对于运行点处水头高度、效率、开度等参数难以详细掌握，考虑到一般混流式机组水头为满足设计的较高运行效率，水头变幅不大(极端情况下，水头可能有20%变化，效率也不到80%)，仿真时式(5)中取 $\eta=1$ ， $k_c=1$ ， $h=1$ ， $y=P_0$ 。基于水头流量变化模型在下文时域仿真时只考虑为流量变化及其引起的水锤时间变化，相当于理想模型中计及水头和水锤时间变化。

额定水头时，从图8、图9可见，额定水头下60%~80%负荷水平，基于流量的运行点变化模型能很好反映系统频率振荡特性，而理想模型则会带来0.06 p.u.以上的频率振幅偏差。

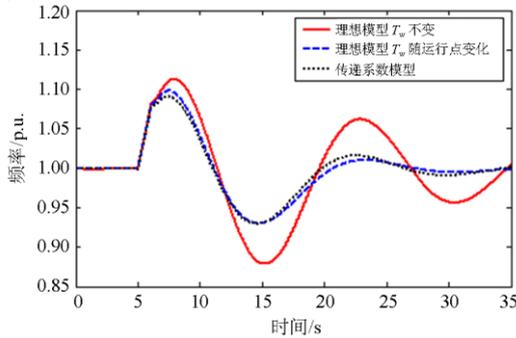


图8 额定水头 80%负荷下 3种模型对比

Fig. 8 Comparison of the 3 models at rated hydraulic head and 80% load

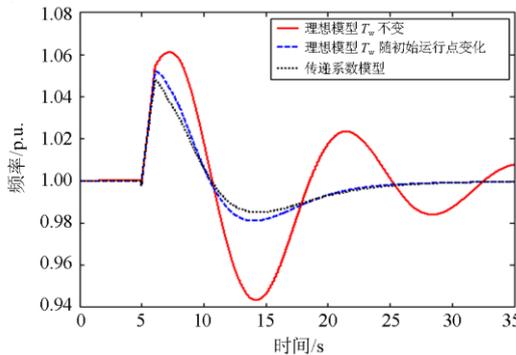


图9 额定水头 60%负荷下 3种模型对比

Fig. 9 Comparison of the 3 models at rated hydraulic head and 60% load

不同水头时，从图10、图11中可见，偏离额

定水头时，30%~60%的较低负荷水平下，基于流量的运行点变化模型和传递函数模型最大频率偏差有所增大，但小于0.02 p.u.，能基本反映超低频振荡特性。在做低周、高周整定分析时，必要时可进一步采用更详细的基于水头流量等运行点变化模型或传递函数模型。

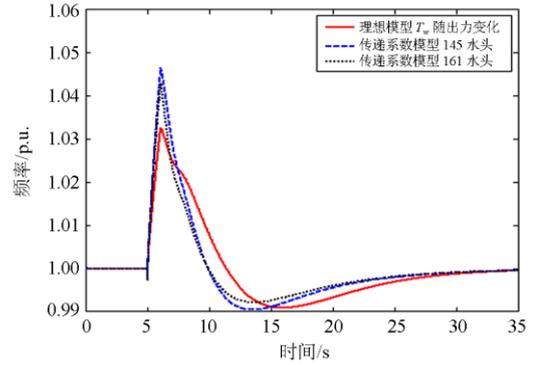


图10 不同水头和 60%负荷下 T_w 变化模型比较

Fig. 10 Availability of the T_w varied model at different hydraulic head on 60% load

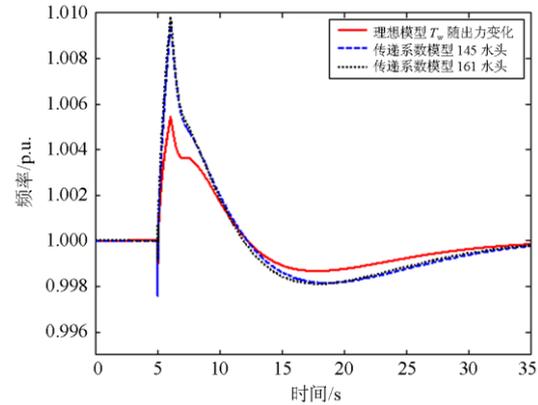


图11 不同水头和 30%负荷下 T_w 变化模型比较

Fig. 11 Availability of the T_w varied model at different hydraulic head on 30% load

4 结论

本文针对水电占主导小电网中存在的频率稳定性问题，对比分析了采用理想模型、基于运行点变化模型、传递系数模型的电网频率动态特性。通过水电机组传递函数，量化分析了不同水头高度及机组不同出力运行时的振荡频率和阻尼特性。通过暂态仿真，研究了不同模型对机组不同运行点扰动后频率的振荡特性。主要结论如下：

1) 在水电机组占主导系统中，水电机组带负荷越小，主导振荡频率越高，正阻尼频带越宽，系统阻尼越强。安排机组运行于高水头，增加水电机组

开机,可有效降低系统发生弱阻尼超低频振荡风险。

2) 水轮机理想模型只适用于额定水头额定负荷下频率稳定性分析。即使在单瞬这样相对不大的扰动下,机组负荷小于80%,最低频率偏差可达0.05 p.u.以上;水头高度偏离额定水头,频率振幅偏差可超0.11 p.u.以上,已难以描述频率振荡特性。

3) 考虑流量的运行点变化模型能较好反映系统频率振荡特性。额定水头时,扰动引发10%频率振荡时计算偏差小于0.01 p.u.;不同水头时,考虑流量的运行点变化模型计算偏差有所增大,必要时可采用更详细的考虑水头流量随运行点变化模型或传递函数模型。

4) 理想模型、基于运行点变化模型、传递系数模型本质上都是基于运行点处线性化模型,当暂态过程中出现运行点大幅变化时,模型准确性都会受到影响。

5) 水电机组调速系统实测建模时,水锤时间常数测试或拟合需要标明试验工况。

参考文献

- [1] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 31-35.
SUN Huadong, TANG Yong, MA Shiyong. A commentary on definition and classification of power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 31-35.
- [2] 杜宾, 张丹, 张军民, 等. 异步联网后云南电网的稳定特性与控制措施[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 13-16, 23.
DU Bin, ZHANG Dan, ZHANG Junmin, et al. Stability characteristics and control measures of Yunnan power grid after asynchronous interconnection[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 13-16, 23.
- [3] 张建新, 刘春晓, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的抑制措施与试验[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 35-39.
ZHANG Jianxin, LIU Chunxiao, CHEN Yiping, et al. Countermeasures and experiments on ultra-low frequency oscillation of Yunnan Power Grid in asynchronous interconnection mode[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 35-39.
- [4] CHEN Gang, TANG Fan, SHI Huabo, et al. Optimization strategy of hydro-governors for eliminating ultra low frequency oscillations in hydro-dominant power systems[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1086-1094.
- [5] 陈刚, 丁理杰, 李旻, 等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 76-82.
CHEN Gang, DING Lijie, LI Min, et al. Stability characteristics of southwest China power grid after asynchronous interconnection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 76-82.
- [6] CHEN Lei, LU Xiaomin, MIN Yong, et al. Optimization of governor parameters to prevent frequency oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4466-4474.
- [7] 王官宏, 于钊, 张怡, 等. 电力系统超低频率振荡模式排查及分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2324-2329.
WANG Guanhong, 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): 2324-2329.
- [8] 郝朝辉, 黄慧, 李威, 等. 周期通信对储能系统参与电网调频的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 41-47.
XI Zhaohui, HUANG Hui, LI Wei, et al. Analysis of the influence of periodic communication on the participation of energy storage system in power grid frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 41-47.
- [9] MO W, CHEN Y, CHEN H, et al. Analysis and measures of ultralow-frequency oscillations in a large-scale hydropower transmission system[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1077-1085.
- [10] 路晓敏, 陈磊, 陈亦平, 等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 64-70.
LU Xiaomin, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Ultra-low-frequency oscillation of power system primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 64-70.
- [11] 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, 28(34): 80-86.
WANG Guanhong, TAO Xiangyu, LI Wenfeng, et al. Influence of turbine governor on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 80-86.
- [12] 何凤军, 刘昌玉, 刘肖, 等. 用于电力系统仿真的水电机组原动机模型适应性研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 165-169.
HE Fengjun, LIU Changyu, LIU Xiao, et al. Study on adaptability of hydropower unit prime motor model for

- power system simulation[J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(2): 165-169.
- [13] 蔡卫江, 荣红. 藏木电厂孤网事故分析及调速器控制策略研究[J]. *水电站机电技术*, 2017, 40(7): 65-67.
CAI Weijiang, RONG Hong. Research on isolated grid fault analysis and Governor control strategy of Zangmu plant[J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2017, 40(7): 65-67.
- [14] 张刘杰, 肖仕武, 黄松柏. 基于灵敏度的孤网动态频率偏移峰值分析和调速系统参数优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(2): 137-143.
ZHANG Liujie, XIAO Shiwu, HUANG Songbai. Dynamic frequency offset peak analysis and speed control system parameter optimization of isolated networks based on sensitivity[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(2): 137-143.
- [15] WANG Peng, LI Baohong, ZHAO Jingbo, et al. The mechanism of ultra-low frequency oscillations with the same mode shapes[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 198047-198057.
- [16] 刘昌玉, 何雪松, 何凤军, 等. 水电机组原动机及其调节系统精细化建模[J]. *电网技术*, 2015, 39(1): 230-235.
LIU Changyu, HE Xuesong, HE Fengjun, et al. Refined modeling of hydraulic prime mover and its governing system for hydropower generation unit[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(1): 230-235.
- [17] 邓磊, 周喜军, 张文辉. 用于稳定计算的水轮机调速系统原动机模型[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(5): 103-107.
DENG Lei, ZHOU Xijun, ZHANG Wenhui. Hydro turbine prime mover model of governor system for power system stability computation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(5): 103-107.
- [18] 王官宏, 濮钧, 陶向宇, 等. 电力系统稳定计算用国产 700 MW 水轮机调节系统建模及参数测试[J]. *电网技术*, 2010, 34(3): 101-105.
WANG Guanhong, PU Jun, TAO Xiangyu, et al. Modeling and parameter testing of governing system for domestic-manufactured 700 MW hydraulic turbine suitable to power system stability calculation[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(3): 101-105.
- [19] 水轮机调节系统建模及参数实测技术导则: DL/T 1800—2018[S].
- [20] XIE Yuzheng, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Development approach of a programmable and open software package for power system frequency response calculation[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 189-198. DOI: 10.1186/s41601-017-0045-1.
- [21] 高慧敏, 刘宪林, 徐政. 水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响[J]. *电网技术*, 2005, 29(2): 5-8.
GAO Huimin, LIU Xianlin, XU Zheng. Effect of detailed hydro turbine models on analysis results of power system transient stability[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(2): 5-8.
- [22] 曹程杰, 莫岳平, 刘洁. 基于 Matlab 模块化模型的水

- 轮发电机组仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 68-71.
- CAO Chengjie, MO Yueping, LIU Jie. A study of water-turbine generator set simulation based on Matlab modularization model[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 68-71.
- [23] 魏守平. 水轮机调节[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
- [24] 肖友强, 邓步青, 文云峰. 计及送端电网频率稳定的直联联络线极限承载能力评估[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 3-12.
- XIAO Youqiang, DENG Buqing, WEN Yunfeng. Total transfer capability assessment of HVDC tie-lines based on frequency stability of the sending-end grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 3-12.
- [25] 郑小草, 王春风, 王境彪, 等. 含直驱风电场的交直流混合系统非强阻尼低频振荡特性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 148-154.
- ZHENG Xiaoge, WANG Chunfeng, WANG Jingbiao, et al. Analysis of the weak or negative damp low frequency oscillation characteristics in AC/DC system integrated by PSMG based wind farms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 148-154.

收稿日期: 2020-08-21; 修回日期: 2021-04-03

作者简介:

丁理杰(1981—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析和控制; E-mail: ding-lijie@163.com

刘姍梅(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为控制理论与控制工程; E-mail: 34538982@qq.com

史华勃(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析和控制。E-mail: shbo87@163.com

(编辑 葛艳娜)