

# 水电机组并网运行频率调节系统的稳定性

张江滨<sup>1</sup>, 李华<sup>2</sup>, 谢辉平<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西省 西安市 710048;

2. 陕西电力科学研究所, 陕西省 西安市 710054)

## Stability of Frequency Regulating System for Hydropower Units in Grid-Connected Operation

ZHANG Jiang-bin<sup>1</sup>, LI Hua<sup>2</sup>, XIE Hui-ping<sup>1</sup>

(1. School of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China; 2. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** On the basis of rigid coupling model of power grid, the stability of frequency regulating system for hydropower units in grid-connected operation is analyzed. With the growth of primary frequency regulating units and their capacity, the frequency stability of power grid deteriorates. If there are many low capacity units and the stability of their regulating systems is poor, it will make the stability of frequency regulating system of whole grid descending or even to the extent that the frequency regulating system of whole grid is instable. Therefore, the attention should be paid to the disregard of system stability while small units are in grid-connected operation and enough stability of single unit regulating system can ensure the stability of multi-unit regulating system. When the dominant time constants of all units' regulating systems are the same, the action of all actuators trends upward synchronous, thus the frequency regulating system of power grid can just achieve high dynamic quality.

**KEY WORDS:** hydropower unit; frequency stability; grid connected operation; dominant time constant

**摘要:** 在刚性联结电网模型基础上, 分析了水电机组并网运行频率调节系统稳定性。随着一次调频机组及容量增加, 产生了电网频率稳定性下降的问题。如果电网中存在多个小容量机组的调节系统, 稳定性较差, 将会引起整个电网频率调节系统稳定性下降或不稳定情况发生。因此必须重视小容量机组并入大电网运行时忽视系统稳定性的现象, 足够的单机调节系统稳定性可以保证多机调节系统的稳定。当各机组调节系统主导时间常数相同时, 各执行机构动作趋于同步, 电网频率调节系统才会获得良好的动态品质。

**关键词:** 水电机组; 频率稳定性; 并网运行; 主导时间常数

## 0 引言

长期以来, 发电机组频率调节系统稳定性研究主要针对单机运行工况<sup>[1]</sup>, 而机组并列运行稳定性研究则主要集中在电力系统遭受扰动后各机组间能否保持同步运行方面。随着我国电力系统规模迅速增大, 各区域电网之间互联引起低频振荡、电压和频率不稳定问题日渐增多。特别是发生频率不稳定时, 潮流、电压以及其他状态变量均会出现大的波动, 并引起系统中的控制及保护动作, 造成更多的机组或负荷切除<sup>[2-3]</sup>。

在电力系统稳定控制中, 功角稳定和电压稳定涉及快速的电磁过程, 其控制策略着眼于电力系统短期行为; 而频率稳定涉及慢速的动力机械过程, 其控制策略着眼于电力系统长期行为。电力系统频率调节分2步进行: 一次频率调节(primary frequency regulation, PFR)和二次调频调节(second frequency regulation, SFR)。PFR是指各机组自身的调节系统依据频率偏差自动地调整机组有功功率, 以维持电网有功功率的平衡和动态过程中频率的稳定; SFR是在一次频率调节基础上, 从整个电力系统的角度, 人为地统筹调度与协调相关因素, 重新分配各机组承担的负荷, 使电网频率始终保持在规定的工作范围之内。

由于电力系统地域分布广阔、实时动态信息传输异常困难, 实际上电网频率动态控制是由分散在各机组的调速器完成的, 属于广义大系统分散控制范畴, 其稳定性分析极其复杂。为简单起见, 通常假设并网运行时各发电机组严格地保持同步运行,

发电机转子保持刚性联结<sup>[4]</sup>，功角之间无相对摆动，把所有机组折算成一个等效机组，并认为各调节机组动态调节过程相同，用单机带负荷模型方法分析。实际上各机组调节系统动态特性差异大，它对机组并网运行工况的频率稳定性有着重要影响<sup>[5-16]</sup>。

## 1 机组并网运行频率调节系统

### 1.1 刚性联结系统模型

若不考虑机电暂态过程，并列运行机组可认为是刚性联结，电网各处的频率时刻都相同。图1为刚性联结水电机组并网运行频率调节系统框图。

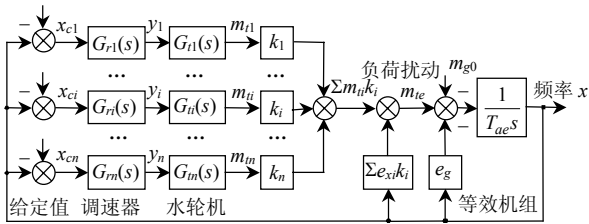


图1 刚性联结水电机组并网运行频率调节系统框图

Fig. 1 Block diagram of rigid coupling hydroelectric units frequency regulating system in grid connected

刚性联结理论认为，电网中  $n$  台机组转子通过磁场刚性连接，其运动方程为

$$T_{ae} \frac{dx}{dt} = m_{te} - m_g \quad (1)$$

式中：  $T_{ae} = \sum_{i=1}^n T_{ai} k_i$  为并列机组等效惯性时间常数；

$m_{te} = \sum_{i=1}^n (m_{ti} + e_{xi} x) k_i$  为并列机组等效主动力矩；

$k_i = P_{ti} / P_s$  为机组额定出力占电网总容量的比重；

$m_g = m_{g0} + e_g x$  为电网总负载力矩。由式(1)可得

$$\sum_{i=1}^n T_{ai} k_i \frac{dx}{dt} = \sum_{i=1}^n m_{ti} k_i - m_{g0} - \sum_{i=1}^n e_{ni} k_i x \quad (2)$$

式中：  $\sum_{i=1}^n e_{ni} k_i = \sum_{i=1}^n (e_g - e_{xi}) k_i = e_g - \sum_{i=1}^n e_{xi} k_i = e_n$ ；  $e_n$

为电网等效的综合自调节系数。等效发电机组的传递函数为

$$G_{ge}(s) = \frac{x(s)}{m_{te}(s) - m_{g0}(s)} = \frac{1}{T_{ae}s + e_n}$$

由图1可以求出并网运行频率调节系统传递函数

$$G_n(s) = \frac{x(s)}{-m_{g0}(s)} = \frac{G_{ge}(s)}{1 + G_{ge}(s) \sum_{i=1}^n k_i G_{ri}(s) G_{ti}(s)} \quad (3)$$

### 1.2 所有机组均参与频率调节

现设各机组频率调节系统同步动作，各调速器、水轮机、发电机数学动态特性均相同，由式

(2)得

$$T_{ai} \sum_{i=1}^n k_i \frac{dx}{dt} = m_{ti} \sum_{i=1}^n k_i - m_{g0} - e_{ni} \sum_{i=1}^n k_i x$$

考虑到  $\sum_{i=1}^n k_i = 1$ ，则有

$$T_{ai} \frac{dx}{dt} = m_{ti} - m_{g0} - e_{ni} x \quad (4)$$

式(4)相当于单机带负荷工况时机组运动方程，说明并网运行工况下稳定性没有得到改善，与单机带负荷工况具有相同的动态特性。

### 1.3 部分机组参与频率调节

设电网中有  $l$  台机组参与频率调节，剩余  $n-l$  台机组处于限负荷工况带固定负荷，由式(2)可得

$$T_{ai} \sum_{i=1}^n k_i \frac{dx}{dt} = m_{ti} \sum_{i=1}^l k_i - m_{g0} - e_{ni} \sum_{i=1}^n k_i x$$

两边同时除以  $\sum_{i=1}^l k_i$ ，可得

$$\frac{T_{ai}}{\sum_{i=1}^l k_i} \frac{dx}{dt} = m_{ti} - \frac{m_{g0}}{\sum_{i=1}^l k_i} - \frac{e_{ni}}{\sum_{i=1}^l k_i} x \quad (5)$$

由于  $\sum_{i=1}^l k_i < 1$ ，此时的惯性时间常数和综合自调节系数均比单机带负荷工况时大，说明提高了并网运行工况稳定性。但考虑到等效的负荷冲击  $m_{g0} / \sum_{i=1}^l k_i > m_{g0}$  亦增大，将使参与频率调节的机组出力变化加剧。

## 2 电网频率调节系统稳定性分析

### 2.1 单机运行工况的稳定性

机组并入大电网运行时，传统上一般只考虑机组带负荷的速动性，认为电网频率基本维持不变，绝大部分机组只承担固定负荷不参与一次调频。但为减少冲击负荷对电网频率的影响，必然要求更多的机组参与一次调频，频率调节系统稳定性就突现出来。设调速器、水轮机和发电机传递函数分别为

$$G_r(s) = \frac{(T_n s + 1)(T_d s + 1)}{(b_t + b_p) T_d s + b_p}$$

$$G_t(s) = \frac{e_y (-e T_w s + 1)}{e_{qh} T_w s + 1}$$

$$G_g(s) = \frac{1}{T_a s + e_n}$$

频率调节系统特征方程为

$$1 + \frac{(T_n s + 1)(T_d s + 1)e_y(-eT_w s + 1)}{[(b_t + b_p)T_d s + b_p](e_{qh}T_w s + 1)(T_a s + e_n)} = 0$$

设  $T_n = e_{qh}T_w$ ，系统特征方程整理后为

$$as^2 + bs + c = 0 \quad (6)$$

$$\begin{cases} a = [(b_t + b_p)T_a - e_y e T_w]T_d \\ b = [(b_t + b_p)e_n + e_y]T_d + b_p T_a - e_y e T_w \\ c = b_p e_n + e_y \end{cases} \quad (7)$$

调节系统为2阶系统，根据劳斯-古尔维茨稳定性判据，调节系统稳定的充要条件为各项系数及其构成的子行列式均大于零，即  $a > 0$ ， $b > 0$ ， $c > 0$ 。

### 2.2 双机并网运行工况的稳定性

由式(3)可知，2台机组调节系统闭环特征方程为

$$1 + G_{ge}(s)[k_1 G_{r1}(s)G_{t1}(s) + k_2 G_{r2}(s)G_{t2}(s)] = 0$$

设  $T_{n1} = e_{qh1}T_{w1}$ ， $T_{n2} = e_{qh2}T_{w2}$ ，整理后可得

$$As^3 + Bs^2 + Cs + D = 0 \quad (8)$$

$$\begin{cases} A = T_{d2}^* a_1 k_1 + T_{d1}^* a_2 k_2 \\ B = (T_{d2}^* b_1 + b_{p2} a_1)k_1 + (T_{d1}^* b_2 + b_{p1} a_2)k_2 \\ C = (T_{d2}^* c_1 + b_{p2} b_1)k_1 + (T_{d1}^* c_2 + b_{p1} b_2)k_2 \\ D = b_{p2} c_1 k_1 + b_{p1} c_2 k_2 \end{cases} \quad (9)$$

其中： $T_{d1}^* = (b_{t1} + b_{p1})T_{d1}$ ； $T_{d2}^* = (b_{t2} + b_{p2})T_{d2}$ 。由特征方程系数所构成的子行列式为

$$\begin{aligned} BC - AD &= (T_{d2}^* T_{d2}^* c_1 + b_{p2} T_{d2}^* b_1 + b_{p2} b_{p2} a_1) b_1 k_1^2 + \\ &(T_{d1}^* T_{d1}^* c_2 + b_{p1} T_{d1}^* b_2 + b_{p1} b_{p1} a_2) b_2 k_2^2 + \\ &[(b_{p2} T_{d1}^* + b_{p1} T_{d2}^*) b_1 b_2 + b_{p1} b_{p2} (a_1 b_2 + \\ &a_2 b_1) + b_{p1} T_{d2}^* a_2 c_1 + b_{p2} T_{d1}^* a_1 c_2] k_1 k_2 + \\ &[T_{d1}^* c_1 (T_{d2}^* b_2 - b_{p2} a_2) + \\ &T_{d2}^* c_2 (T_{d1}^* b_1 - b_{p1} a_1)] k_1 k_2 \quad (10) \end{aligned}$$

现设单机带负荷工况下，2台机组各自的频率调节系统是稳定的，即有  $a_1 > 0$ ， $b_1 > 0$ ， $c_1 > 0$ ； $a_2 > 0$ ， $b_2 > 0$ ， $c_2 > 0$ ，由式(9)可得： $A > 0$ ， $B > 0$ ， $C > 0$ ， $D > 0$ 。

从式(10)可以看出，只要  $T_{d1}^* b_1 - b_{p1} a_1 > 0$  与  $T_{d2}^* b_2 - b_{p2} a_2 > 0$  能够同时满足，就能确保  $BC - AD > 0$ 。由式(7)可见，一般满足系统稳定且保持较好的动态特性时， $T_d b$  和  $a$  数值大小应在一个数量级上，则  $T_d^* b = (b_t + b_p)T_d b$  较  $b_p a$  要大得多， $T_d^* b - b_p a > 0$  很容易得到满足。

现取单机电网额定负荷工况参数： $e_n = 2.0$ ， $e_y = 1.0$ ， $e_{qy} = 1.0$ ， $e_h = 1.5$ ， $e_{qh} = 0.5$ ， $e = 1.0$ ，

按斯坦因推荐的调节参数，取  $T_n = 0.5T_w$ ， $b_t + b_p = 1.5T_w/T_a$ ， $T_d = 3T_w$ ，代入式(7)得

$$\begin{cases} a = 1.5T_w^2 > 0 \\ b = b_p T_a + (b_t + b_p)e_n T_d + 2T_w > 0 \\ c = b_p e_n + e_y > 0 \end{cases}$$

$$T_d^* b - b_p a = b_t T_d b + b_p T_d [b_p T_a + (b_t + b_p)e_n T_d + 1.5T_w] > 0$$

此时满足系统稳定条件，说明双机并列运行时频率调节系统是稳定的。

### 2.3 多机并网运行工况的稳定性

考虑到  $\sum_1^n k_i = 1$ ，并网工况调节系统的特征方程也可写成

$$\sum_1^n k_i [1 + G_{r_i}(s)G_{t_i}(s)G_{ge}(s)] = 0$$

设  $T_{ni} = e_{qhi}T_{wi}$ ，整理后得

$$\sum_1^n \frac{k_i}{b_{pi}} \frac{(a_i s^2 + b_i s + c_i)}{(T_{gi} s + 1)(T_a s + e_n)} = 0 \quad (11)$$

其中  $T_{gi} = (\frac{b_i}{b_{pi}} + 1)T_{di}$ ，称为主导时间常数，其

对应的主导极点  $-1/T_{gi}$  靠虚轴距离最近。从式(11)可得出，多机系统特征方程的阶数会随着机组的台数增加而增加，当电网中有  $n$  台机组时，系统阶数为  $n+1$  阶。多机系统特征方程系数仍可表示为  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 、 $k_i$  的线性组合，计算相对简单，但由系数所构成的子行列式计算却十分复杂。当并网运行机组台数很多时，直接采用代数判据来判别系统的稳定性就相当困难。

设  $T_{gi} = T_g$ ， $i = 1 \sim n$ ，多机系统阶数并未增加，特征方程可写成  $As^2 + Bs + C = 0$ ，也为2阶系统。

其中： $A = \sum_1^n \frac{k_i}{b_{pi}} a_i$ ； $B = \sum_1^n \frac{k_i}{b_{pi}} b_i$ ； $C = \sum_1^n \frac{k_i}{b_{pi}} c_i$ 。

此时只要每台机组单机运行调节系统是稳定的，即  $a_i > 0$ ， $b_i > 0$ ， $c_i > 0$ ，必然有  $A > 0$ ， $B > 0$ ， $C > 0$ ，则多机并网运行调节系统是稳定的；相反，如果每台机组调节系统是不稳定的，则多机调节系统也是不稳定的；如果部分机组调节系统是稳定的，另一部分机组调节系统是不稳定的，则要根据各台机组调节系统稳定或不稳定程度、以及机组在电网中所占容量的比重计算  $A$ 、 $B$ 、 $C$  值，从而判断整个系统的稳定性。

虽然大容量机组对整个系统稳定性影响较大，但是若系统中存在多个小容量机组的调节系统不稳定，势必降低整个调节系统的稳定性，甚至会

导致整个调节系统的不稳定。为提高机组带负荷指令响应速度，现仍存在许多小容量机组并入大电网后将调节参数切换到不利于稳定性的一组参数，而这组参数在单机运行时常常是不稳定的一组参数。

### 3 电网频率调节系统仿真

#### 3.1 仿真模型

电网由机组 1 和机组 2 组成，也可认为把多机电网划分为 2 部分，系统的仿真模型如图 2 所示。用下标 1、2 表示对应的名称或参数，未注明下标表示公共参数或两部分参数相同。设负荷扰动量  $m_{g0}=-0.02$ ，继电器初值  $y_{10}=0.99$ ， $y_{20}=0.95$ ，并取参数  $T_n=1.0\text{ s}$ ， $b_p=0.03$ ， $T_w=2.0\text{ s}$ ， $T_a=10.0\text{ s}$ 。

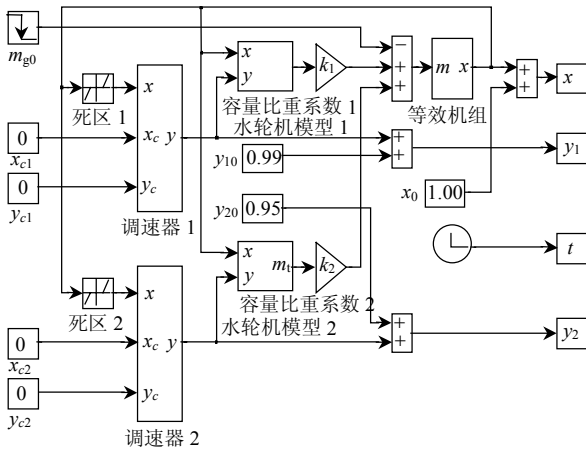


图 2 机组并网运行频率调节系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of units frequency regulating system in grid connected operation

#### 3.2 人工频率死区的影响

图 3 为人工频率死区变化时系统的仿真曲线， $k=0.5$ ， $b_f=0.27$ ， $E_f=0$ 。图 3(a)、3(b)为 2 部分机组均参与电网频率调节，相当于单机带负荷工况，图 3(a)动态特性较为理想；图 3(c)、3(d)仅有第 1 部分机组参与电网频率调节，频率变化未超过第 2 部分机组人工死区带固定负荷；图 3(e)、3(f)频率变化初期超过第 2 部分机组人工死区参与调节，频率变化进入人工死区  $E_{f2}=0.005$  范围后，开度不再受频率变化的影响。

对比图 3(a)、3(c)，部分机组参与调节时的调频容量减小，调节机组  $y_1$  执行机构变幅加大，调节时间明显变长，这是由于等效的负荷冲击增大引起的。对比图 3(b)、3(d)，全部机组参与调频调节系统稳定性较差时，而部分机组参与调频会使调节系统稳定性大为改善，相当于等效机组惯性时间常数

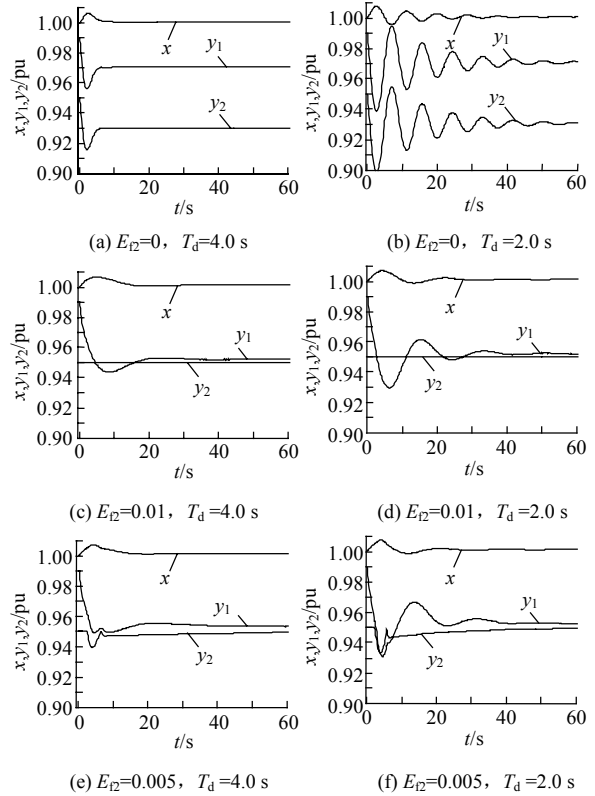


图 3 人工频率死区变化时的仿真曲线  
Fig. 3 Simulating curve at the different man-made frequency dead band

及综合自调节系数增大，调节系统稳定性加强；实际上参与电网一次调频的机组台数会随着频率偏差大小是否超过人工频率死区而变化。图 3(e)、3(f)说明此种非线性调节系统的动态特性比起线性系统动态过程要复杂得多，前期频率偏差超过人工频率死区，动态过程接近于整体调节过程，后期频率偏差进入人工频率死区，动态过程与部分调节过程基本类似。

#### 3.3 调节参数的影响

图 4 为调节参数变化时系统的仿真曲线， $b_{f1}=0.27$ ， $b_{f2}=0.57$ ， $E_f=0$ 。从图 4(a)中可以看到， $y_1$  与  $y_2$  在初始快速变化结束后趋于平衡位置过程中，其变化趋势相反，即  $y_1$  在逐渐增大， $y_2$  在逐渐减小。图 4(c)具有同样地变化规律。而图 4(e)中， $y_1$  与  $y_2$  在初始快速变化结束后很快就进入平衡状态，其整体变化趋势基本相同。造成上述结果的原因是机组 1 和机组 2 的主导时间常数  $T_g$ 。图 4(a)中  $T_{g1}=20\text{ s}$ ， $T_{g2}=80\text{ s}$ ；图 4(c)中  $T_{g1}=30\text{ s}$ ， $T_{g2}=60\text{ s}$ ；图 4(e)中  $T_{g1}=T_{g2}=40\text{ s}$ 。

在图 4(b)、4(d)、4(f)中取  $k_1=0.01$ ， $k_2=0.99$ 。机组 2 容量很大，决定着整个系统的动态过程；而

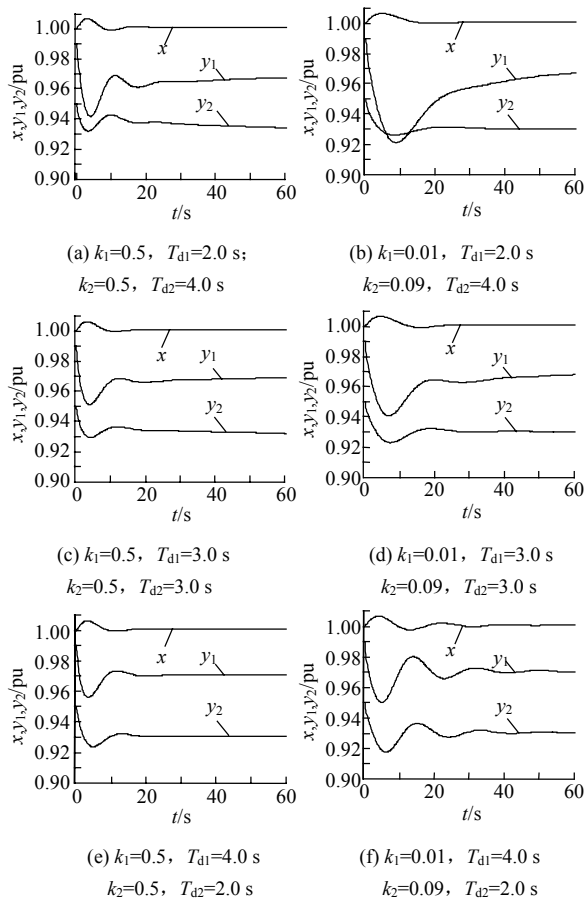


图 4 调节参数变化时的仿真曲线  
**Fig. 4 Simulating curve at the different regulating parameter**

机组 1 容量很小，相当于小机组并入大电网运行情况。由图 4(b)、4(d)、4(f)中可以看出，系统频率变化基本相同，图 4(b)调节系统主导时间常数  $T_{g1}=20\text{ s}$  较小， $y_1$  动作速度快，执行机构变幅较大；由于图 4(f)调节系统主导时间常数  $T_{g1}=T_{g2}=40\text{ s}$ ，小机组与大机组执行机构动作同步，执行机构变幅较小，有利于改善机组一次调频动态过程。

#### 4 结论

1) 采用全部机组进行一次调频时，调节系统稳定性会下降。但由于等效负荷冲击变大，仅部分机组参与一次调频将使机组出力变化加剧、系统静态频率偏差增大，影响电网的供电质量。

2) 如果单机带负荷工况下调节系统是稳定的，且调节参数在正常的推荐范围之内时，很容易使双机调节系统稳定；多机调节系统的阶数会随着机组的台数增加而增加，加上人工频率死区的影响，高阶非线性系统稳定性分析十分复杂。

3) 当各机组调节系统主导时间常数相差较大

时，系统在趋近平衡过程中各机组开度变化趋势相反，机组负荷相互转移，造成网损增加及电力系统的潮流无序变化；当各机组调节系统主导时间常数相同时，执行机构动作基本同步，调频动态过程品质较好。

4) 如果所有机组调节系统主导时间常数相同，多机调节系统近似为 2 阶系统。只要每台机组单机运行调节系统是稳定的，则多机并网运行调节系统就能够稳定；如果只有部分机组调节系统是稳定的，整个调节系统是否稳定取决于每一台机组调节系统稳定程度、以及容量比。虽然大容量机组对整个系统稳定性影响较大，但是若系统中存在多个小容量机组的调节系统不稳定，势必降低整个调节系统的稳定性，甚至会导致整个调节系统的不稳定。因此，必须充分重视小容量机组并入大电网运行时带负荷的速动性和忽视稳定性的现象。

#### 参考文献

- [1] 叶鲁卿. 水力发电过程控制理论、应用与发展[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2002: 12-198.
- [2] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 1-7.
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 沈祖谟. 水轮机调节[M]. 3 版. 北京: 中国水利电力出版社, 1998: 197-199.
- [5] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 2-6.  
 Hu Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America power grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6(in Chinese).
- [6] 于达仁, 郭钰锋, 徐基豫. 发电机组并网运行一次调频的稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 59-63.  
 Yu Daren, Guo Yufeng, Xu Jiyu. The primary frequency regulation stability of parallel turbo-generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 59-63(in Chinese).
- [7] 郭钰锋, 于达仁, 赵婷, 等. 电网频率的非正态概率分布特性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 26-31.  
 Guo Yufeng, Yu Daren, Zhao Ting, et al. Characteristics of power system frequency abnormal distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 26-31(in Chinese).
- [8] 于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 72-76.  
 Yu Daren, Guo Yufeng. The online estimate of primary frequency control ability in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 72-76(in Chinese).

- [9] 于达仁, 郭钰锋. 一次调频的随机过程分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 38-41.  
Yu Daren, Guo Yufeng. Analysis on random process of the primary frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 38-41(in Chinese).
- [10] 都亮, 刘俊勇, 雷霞, 等. 电力网络调频容量释放过程及其指标体系[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 6-12.  
Du Liang, Liu Junyong, Lei Xia, et al. Research on release of power grid frequency regulation reserve and its index[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 6-12(in Chinese).
- [11] 都亮, 刘俊勇, 肖兰, 等. 基于电力网络一次调频动态模型建立及仿真[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9): 1-6.  
Du Liang, Liu Junyong, Xiao Lan, et al. Grid - based PFR dynamic modeling and its simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9): 1-6(in Chinese).
- [12] 肖晋宇, 谢小荣, 李建, 等. 电网广域动态安全监测系统及其动态模拟试验[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 5-9.  
Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Li Jian, et al. Wide-area dynamic security monitoring system for power network and its dynamic simulation [J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 5-9(in Chinese).
- [13] 郑宝森, 郭日彩. 中国互联电网的发展[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 1-3.  
Zheng Baosen, Guo Ricai. Development of interconnected power grid in China[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 1-3(in Chinese).
- [14] 戴义平, 赵婷, 高林. 发电机组参与电网一次调频的特性研究[J]. 中

国电力, 2006, 39(11): 37-41.

Dai Yiping, Zhao Ting, Gao Lin. Research on characteristics of power system primary frequency control operating on power plants [J]. Electric Power, 2006, 39(11): 37-41(in Chinese).

- [15] 杨建华. 华中电网一次调频考核系统的研究与开发[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 96-99.  
Yang Jianhua. Research and development of assessment system of primary frequency regulation in central China power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 96-99(in Chinese).
- [16] 于达仁, 毛志伟, 徐基豫. 汽轮发电机组的一次调频动态特性[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 221-225.  
Yu Daren, Mao Zhiwei, Xu Jiyu. Dynamic characteristic of primary frequency regulation of turbo-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 221-225(in Chinese).



张江滨

收稿日期: 2008-08-10.

作者简介:

张江滨(1962—), 男, 教授, 主要从事水利电力自动化科学研究及教学工作, E-mail: xautzjb@yahoo.com.cn.

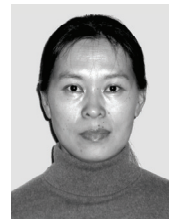
(责任编辑 王晔)

(上接第 43 页 continued from page 43)

- [7] 邓志, 吴捷. 一种电力系统自校正稳定器[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 40-44.  
Den Zhi, Wu Jie. A self-tuning power system stabilizer [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 40-44(in Chinese).
- [8] 杜正春, 刘伟, 方万良, 等. 小干扰稳定性分析中关键特征值计算的稀疏实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 17-21.  
Du Zhengchun, Liu Wei, Fang Wanliang, et al. A sparse method for the calculation of critical eigenvalue in small signal stability analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 17-21(in Chinese).
- [9] 周保荣, 房大中, 孙景强. 基于轨迹灵敏度分析的 PSS 参数优化设计[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 20-23.  
Zhou Baorong, Fang Dazhong, Sun Jingqiang. Tuning of PSS parameters using optimization approach based on trajectory sensitivity analysis[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 20-23(in Chinese).
- [10] 赵辉, 刘鲁源, 张更新. 基于微粒群优化算法的最优 PSS 设计[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 32-35.  
Zhao Hui, Liu Luyuan, Zhang Gengxin. Optimal design of power system stabilizer using particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 32-35(in Chinese).
- [11] Abido M A. Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17(3): 406-413.
- [12] 蔺红, 晁勤. 基于 Matlab PSS 参数优化仿真分析[J]. 水力发电, 2008, 3(6): 77-80.

Lin Hong, Chao Qin. Simulation study on parameter optimum for PSS based on Matlab[J]. Water Power, 2008, 34(6): 77-80(in Chinese).

- [13] 刘红超, 雷宪章, 李兴源, 等. 互联电力系统中 PSS 的全局协调优化[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 1-6.  
Liu Hongchao, Lei Xianzhang, Li Xingyuan, et al. Global coordinated optimization of PSSs in interconnected power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 1-6(in Chinese).
- [14] 李虹, 刘启胜. 多机电力系统中 PSS 配置点的合理选择[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 25-28.  
Li Hong, Liu Qisheng. Rational selection of positions to configurate power system stabilizers in multi-machine power[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 25-28(in Chinese).
- [15] 林其友, 陈星莺, 曹智峰. 多机系统调速侧 GPSS 的设计[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 54-58.  
Lin Qiyu, Chen Xingying, Cao Zhifeng. Design of a governor-side power system stabilizer for multi-machine power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 54-58(in Chinese).



蔺红

收稿日期: 2008-10-14.

作者简介:

蔺红(1969—), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统稳定性控制及风力发电, E-mail: Tseagle@163.com;

晁勤(1959—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统仿真计算与风力发电。

(责任编辑 杜宁)