

# 汽轮机单阀-顺序阀切换造成电力系统振荡分析

文贤馗, 邓彤天, 于东, 李艳

(贵州电力试验研究院, 贵阳 550002)

**摘要:** 针对因汽轮机单阀与顺序阀切换造成功率波动、电力系统振荡的事故, 介绍了汽轮机进行单阀-顺序阀切换的原因, 通过对造成功率波动的原因分析, 指出根据现场实际测量的阀门流量特性进行汽轮机调速系统参数设置是解决负荷波动的最根本办法, 在现场条件不具备的情况下, 选择合适的操作方式、切换时间和蒸汽参数也能很好的控制负荷波动。  
**关键词:** 汽轮机; 单阀运行; 顺序阀运行; 单阀-顺序阀切换; 电力系统振荡

## Analysis of Power System Oscillation by Turbine Single/Sequence Valve Switching

WEN Xian-kui, DENG Tong-tian, YU Dong, LI Yan

(Guizhou Electric Power Testing & Research Institute, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Aiming at an accident that single/sequential valve switching operation of steam turbine has caused power fluctuation and power system oscillation, the reason of single/sequential valve switching operation and valve switching theory are introduced. By analyzing the causes of power fluctuation, it is pointed out that the essential means to resolve the power fluctuation is setting up the valve settings for steam turbine governing system according to the actual measured valve flow characteristics. Alternatively, an appropriate selection of operation mode, switching time and steam parameter can also keep the power fluctuation under control.

**Key words:** steam turbine; single valve operation; sequence valve operation; single/sequential valve switching; power system oscillation

发电机组的安全运行状况将直接影响到电网的安全, 发电机组的原动机功率周期性波动可能会造成全网性的强迫功率振荡, 危及电网安全。例如, 南方电网《关于清查南方电网发电机组原动机功率振荡源的通知》中讲到, 2008 年 4 月 21 日南方电网发生一次由于汽轮机单顺阀切换时功率波动造成的电网系统振荡事故。

该事故的具体过程如下: 某电厂 2008 年 4 月 21 日 7 时 13 分消缺工作结束, 恢复负荷, 10 时 26 分升负荷至 148 MW, 阀门为单阀方式运行, 高压调节汽门 (GV) 开度均为 41%, 主蒸汽压力 16.76 MPa, 温度 533 °C, 再热蒸汽压力为 1.65 MPa, 温度 528 °C, 开始进行单阀-顺序阀切换。在切换过程中, 机组负荷在 142~165 MW 之间波动。发现负荷波动后, 10 时 28 分目标负荷由 150 MW 设定为 160 MW, 10 时 31 分重新设定为 165 MW, 10 时 35 分完成由单阀切为顺序阀的操作。此时负荷 169 MW, 高压调节汽门阀位 44.89%, 主蒸汽压力 16.5 MPa, 温度 537 °C, 再热蒸汽压力 1.7 MPa, 温度 524 °C。在机组功率持续波动的情况下, 电网出

现了强迫振荡。

## 1 单阀-顺序阀切换介绍

### 1.1 进行单阀-顺序阀切换的原因

单阀操作和顺序阀操作是汽轮机阀门管理的两种方式。单阀的优点是所有调节阀都处于开启位置, 是全周进汽, 可以均匀加热汽轮机, 使机组启动升温时沿圆周温度较均匀, 热应力较小, 缺点是节流损失较大, 不经济; 顺序阀的优点是在部分负荷运行时节流损失少经济性较好, 缺点是用这种方式控制机组启动升温加热不均匀, 容易形成较大热应力。

汽轮机控制方式为用单阀 (节流调节方式) 控制启机, 机组升温完成后, 用顺序阀 (喷嘴调节方式) 控制负荷变化。单阀-顺序阀切换目的是为了提 高机组的经济性和稳定性, 其实质是实现节流调节与喷嘴调节的无扰切换, 解决变负荷过程中的均热要求与部分负荷经济性的矛盾。

制造厂为了保证新机组膨胀均匀、安全运行, 一般规定新机组投产半年内须采用单阀运行方式, 半年后才允许切换为顺序阀方式运行。

### 1.2 阀门切换设计原理

假设阀门切换过程中汽轮机运行工况稳定, 即真空和主、再热蒸汽参数不变, 不考虑抽汽的影响, 汽轮机的负荷仅由蒸汽流量决定, 而各个调节阀所控制的流量也只和阀门开度有关, 则可认为汽轮机负荷仅是阀门的单函数。用  $Y$  表示汽轮机负荷,  $X$  表示阀门开度,  $n$  表示阀门数 (一般为 4 或 6 个), 则在单阀方式下

$$Y_a = \sum_{i=1}^n f_i(X_{ai}),$$

在顺序阀方式下

$$Y_b = \sum_{i=1}^n f_i(X_{bi}),$$

在单阀-顺序阀切换的中间过程任意状态下

$$Y = \sum_{i=1}^n f_i(X_i).$$

如果要求单阀、顺序阀方式及切换过程中负荷无扰动, 则  $Y_a = Y_b = Y$ , 即

$$\sum_{i=1}^n f_i(X_{ai}) = \sum_{i=1}^n f_i(X_{bi}) = \sum_{i=1}^n f_i(X_i).$$

由于 4 个高压调节阀设计相似, 理想情况下认为完全相同, 并假设经阀门曲线修正后, 阀门开度与流量成正比, 即阀门开度与汽机负荷成正比, 则  $f_i(X_i) = KX_i$ 。所以, 满足阀门无扰动切换条件为

$$\sum_{i=1}^n X_{ai} = \sum_{i=1}^n X_{bi} = \sum_{i=1}^n X_i.$$

为简化问题, 可以设定边界条件  $X_i = F_i(X_{ai}, X_{bi})$ 。满足该边界条件的最简单的解是:

$$X_i = K_a X_{ai} + K_b X_{bi},$$

且

$$K_a + K_b = 1.$$

式中:  $K_a$  为单阀系数;  $K_b$  为顺序阀系数。

当阀门处于单阀方式时  $K_a = 1, K_b = 0$ ; 当阀门处于顺序阀门方式时  $K_a = 0, K_b = 1$ ; 而阀门处于切换的中间状态时 (既非单阀也非顺序阀)  $0 < K_a < 1, 0 < K_b < 1, K_a + K_b = 1$ 。

图 1 是典型的单阀-顺序阀切换的逻辑图。

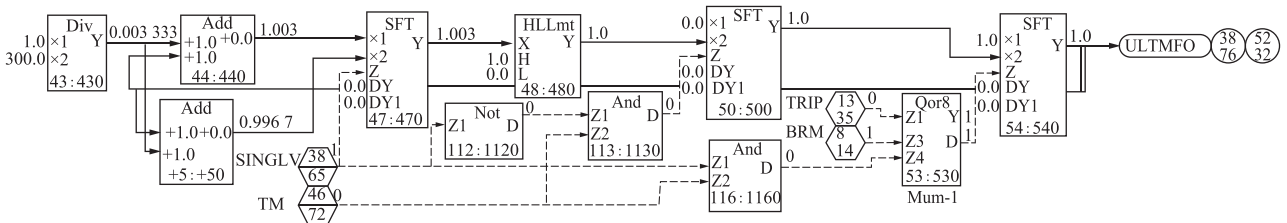


图 1 单阀-顺序阀切换原理逻辑图

Fig.1 The Principle Frame of Single/Sequential Valve Switching

## 2 单阀-顺序阀切换造成功率波动的原因

### 2.1 阀门流量曲线

在阀切换过程中, 有的阀门开大, 有的阀门关小, 如果阀门开大所增加的流量与阀门关小所减少的流量相等, 则切换过程中流量不发生变化, 汽轮机负荷就会保持稳定, 不会发生扰动。

从阀门切换逻辑图中可以看出, 阀门切换过程中各个阀门的开关是根据各阀门流量特性曲线所决定的, 而目前各汽轮机数字电液控制系统 (DEH) 厂家的阀门流量特性曲线基本上是以汽轮机制造厂提供的经典曲线为蓝本的。由于现场安装、日常维护对阀门行程的调整以及阀门重叠度设置不同等原因, 各机组的阀门流量特性曲线均可能发生变化。如果阀门流量特性曲线与阀门实际流量特性不符, 将造成切换前后相同负荷指令下蒸汽流量不同, 这是引起机组负荷大幅波动的根本原因<sup>[1-4]</sup>。

### 2.2 操作方式

一般在阀门切换时, 汽轮机数字电液控制系统有投入协调控制 (CCS) 以及投入功率回路、调节级压力回路几种方式<sup>[5]</sup>。

当 CCS 投入时, DEH 系统的阀门管理程序处于阀位控制状态, 接受 CCS 系统的指令, 控制阀门开度来调节机组功率和机前压力。此时进行阀门控制方式的切换, 阀门管理程序会以切换前的负荷指令为依据 (假定切换过程中没有增、减负荷的操作), 确定另一种调节方式下的调节阀流量指令, 该流量指令在 DEH 中经各阀门的流量特性曲线转换为阀位控制指令。当阀门的流量特性曲线与阀门实际流量特性相差较大, 则同一负荷指令下阀门切换前后必然产生不同的蒸汽流量, 从而引起机组负荷波动。

相反地, 如果 DEH 系统功率回路和调节级压力回路投入, 在进行阀门控制方式的切换时, 保持功率给定值保持不变, 如阀门的流量特性曲线与阀门

实际流量特性不相符,则功率和调节级压力均会产生一定的扰动,功率和调节级压力的扰动分别经功率回路和调节级压力回路校正后,产生新的流量请求值,阀门管理程序根据新的流量请求值合理分配各阀门的控制指令,使功率恢复到原稳定值,在阀门切换过程中将功率的波动调节在合理的范围内。

### 2.3 切换时的蒸汽参数

切换时如蒸汽参数偏高(特别是主蒸汽压力),如本案例,造成调门开启阀位小,这样在阀位波动较小时负荷波动较大。蒸汽压力高还造成流量特性曲线与实际流量偏离严重,更加重了负荷的波动。

### 2.4 切换时间

国内常用 DEH 的切换时间在 2~3 min,或 5~10 min。如阀切换时间过短,切换过程中,相当于同等时间内 DEH 给出的负荷(流量)指令变化量大,则阀门动作迅速,在流量特性曲线与实际流量偏离时容易造成负荷的波动。因此我们推荐在进行单阀-顺序阀切换初期采用较长的切换时间,在切换几次后、负荷波动不大时再逐渐减少切换时间。

## 3 解决单阀-顺序阀切换时负荷波动的方法

### 3.1 通过试验测量实际流量特性

所有影响阀切换时负荷波动的因素中,DEH 系统中阀门的流量特性曲线与实际不一致是最根本的因素。最有效的解决办法是通过阀门试验测取调节汽阀的升程-流量特性曲线,测取顺序阀控制方式下阀门的最佳重叠度,根据试验数据优化阀门管理程序中阀门流量特性曲线、重叠度。

试验中应首先测取单阀方式下高压调门升程与流量(调节级压力)特性,然后测取多阀方式下高压调门升程与流量特性。通过测量阀位给定值、流量指令、阀位开度、主蒸汽压力、调节级压力、主蒸汽温度、高压缸排汽压力、高压缸排汽温度、实际功率等参数,计算单个阀的理论流量特性和流量系数<sup>[5]</sup>。

### 3.2 选择合适的控制方式和参数

现场操作中可通过以下方法来控制负荷波动:

1) 投入功率回路或调节级压力回路。这样的操作方式可以使机组处于一个有功率反馈的闭环控制,从而保证功率的稳定。

2) 保持合适的蒸汽参数。阀切换时应注意蒸汽参数宜低不宜高,参数低则阀门开度大,阀门切换对负荷的影响就不会太大。最极端的做法就是降

低参数至阀门全开时进行阀切换,此时切换前后阀门都处在全开位置,切换只是 DEH 内部逻辑的转换而阀门位置不发生变化,这样就可确保阀门切换时负荷不会发生波动。

3) 选择合适的切换时间。实践证明适当延长阀切换时间后,DEH 中每一个控制周期阀门的变化量减小,负荷扰动减小。同时由于切换时间变长,功率回路和调节级压力同路的调节作用使负荷扰动变得更小,能有效消除阀切换时机组负荷的大幅波动。

## 4 结 语

本文分析单阀-顺序阀切换造成功率波动事故的原因,指出根据现场实际测量的阀门流量特性进行汽轮机调速系统参数设置是解决负荷波动的最根本办法;若现场不具备这种条件,选择合适的操作方式、切换时间和蒸汽参数也能很好地控制汽轮机的负荷波动。

### 参考文献:

- [1] 姚忠太. 漳泽发电厂 4 号机 DEH 改造后单阀与顺序阀切换的探索[J]. 山西电力. 2003, 114 (s1): 13-14.  
YAO Zhong-tai. Study of Switchover of Single Valve and Sequence Valve after Modernization of DEH about Unit 4 in Zhangze Power Plant [J]. Shanxi Electric Power, 2003, 114 (s1): 13-14.
- [2] 李继奇. DEH 单阀-顺序阀切换过程中机组负荷扰动大的分析[J]. 江苏电机工程. 2007, 26 (3): 70-72.  
LI Wei-qi. Analysis of Large Perturbation of Unit Load during the Course of Switch between Single Valve and Sequencing Valve [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26 (3): 70-72.
- [3] 陈永科. 300 MW 机组阀切换负荷波动原因分析[J]. 自动化博览. 2006, 23 (2): 69-70.  
CHEN Yong-ke. Cause Analysis on Load Variation of Valve Switching in 300 MW Generation Unit [J]. Automation Panorama, 2006, 23 (2): 69-70.
- [4] 吕继奎, 陆继东. 国产 300 MW 机组阀切换时负荷波动原因分析及对策[J]. 广东电力. 2002, 15 (1): 47-49.  
LÜ Ji-kui, LU Ji-dong. Cause Analysis and Countermeasures of Load Fluctuations during Valve Switching of a Domestic 300 MW Unit [J]. Guangdong Electric Power, 2002, 15 (1): 47-49.
- [5] 文贤旭, 康健, 申自明. 火电厂汽轮机控制系统改造[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2008-07-08

作者简介:

文贤旭(1972-),男,贵州福泉人。高级工程师,硕士,主要研究方向为汽轮机调速系统、经济性分析等。E-mail: wenxiankui@gzsy.csg.cn。

邓彤天(1969-),男,四川达州人。高级工程师,学士,主要研究方向为汽轮机调速系统、经济性分析等。

于东(1975-),男,贵州贵阳人。高级工程师,学士,主要研究方向为汽轮机调速系统、经济性分析等。