

DEH 功率闭环下负荷波动大问题的研究及处理

李丹,贾昌磊

(大唐三门峡发电有限责任公司, 河南三门峡, 472143)

摘要: 本文针对和利时 DEH 系统单顺阀切换过程中, 投入功率闭环时负荷波动大问题进行了研究, 介绍了功率回路和阀门管理逻辑的产生过程, 通过建立数学模型理论分析, 结合数据仿真, 发现和利时 DCS 系统阀门流量管理函数存在封口功能缺失, 论证了分析复杂问题的一种通用转换思想。

关键词: DEH; 功率回路; 负荷波动; 阀门管理

1 引言

根据大型单元机组安全和经济运行的需要, DEH 对调节汽门的控制有顺序阀 (喷嘴调节) 和单阀 (节流调节) 两种方式。

顺序阀控制方式是随着机组负荷的增加逐个开启调节阀, 采用部分进汽方式能使调节阀的节流损失最小, 因而使机组有较高的热效率。但这种方式可能存在金属受热不均和叶片受到冲击产生应力, 而使机组变负荷速度受到限制。

单阀控制方式是将所有调节阀同时开大或关小来调节负荷的, 是全周进汽方式。在冷态启动或发电机作尖峰负荷时的调峰机组情况下, 希望选用全周进汽的方式, 因为这样能使汽轮机高压缸第一级汽室的温度变化比较均匀, 使汽轮机转动部分与静止部分之间的温差减少, 因而使调频机组能承受更大的负荷变化率。但这种方式由于存在节流损失, 对机组经济性是不利的。

为了兼顾机组不同工况下的安全经济运行,

需要进行单顺阀方式的切换。在切换期间, 为保持功率平稳, 须将 DEH 置本地操作员自动方式, 投入功率回路, 此时阀门的流量总指令经由功率回路产生, 流量指令经过阀门管理程序和阀门流量特性曲线的修正, 输出阀门的开度指令信号, 进入阀门控制卡件, 控制阀门开度, 调节汽轮机进汽量, 进而控制机组负荷。

2 事件现象

调速汽门分组方式为: 1、3 号为一组, 在上部, 2、4 号为一组, 在下部, 顺序方式按照 1-2-3-4 号的顺序依次开启, 此次异常现象发生在机组由顺序阀向单阀方式切换期间, 切换前高压调节汽门 GV1, GV2 开度 29%, GV3, GV4 全关, 切换时投入 DEH 功率回路, 切换时长为预设时间 300s, 切换完成后, 4 个阀门开度一致, 在切换过程中, 功率出现较大幅度波动, 最高±13MW。见图 1



图 1

3 原因分析

3.1 整体曲线分析

一般认为闭环调节回路，调节对象发生大幅波动，大多是 PID 参数设置不合理导致的，但是通过对曲线的分析，发现实际情况并不是这样。

从图 1 可以看出，顺序阀向单阀切换过程中，开始时刻，GV1, GV2 在缓慢关闭，负荷减小，在功率闭环的调节下，功率 PID 输出持续增加，GV1, GV2 的下降速度大为减缓，随着时间推移，在经历 129s 后，GV3 逐步开启，功率开始升高，功率 PID 输出减小，这时候 GV1, GV2 关闭速度开始加快，229s 后，GV4 开始开启，此时功率快速上涨，功率 PID 回路输出快速减小，但是随着 GV3, GV4 开启，流量迅速增大，负荷迅速升高（最高和给定值偏差 13MW），此时功率 PID 回路输出虽然快速减小，但是切换时间快要结束了，按照逻辑要求，四个调门开度应完全一致了，GV4 需快速开启保持和其他调门开度一致，快速开启所带来的流量增加速度远大于功率回路要求的流量指令下降速度，功率回路已经调整不过来了。由于炉侧供给燃料没有发生变化，根据机炉供求能量的平衡关系，功率最终会恢复到给定值。

通过整体过程的分析，可以看出功率回路输出的流量指令，和功率的偏差是吻合的，可排除

功率回路调节导致负荷的波动。而各个阀门开度对应的总流量，与期望的总流量不匹配，才是导致功率波动的直接原因。

机组对应的流量指令经过阀门流量管理曲线，变换成其开度指令，通过各个阀门的开度变化，得到匹配的流量值。通过上述分析，可以得出在切换过程中，四个阀门开度不同所产生的流量，与流量给定值不匹配，导致了功率发生较大波动。故初步怀疑阀门流量特性曲线不合理，需要进行阀门流量曲线的优化工作。

下面介绍一下功率回路下流量指令的产生过程，以及阀门流量管理逻辑，再分析造成流量不匹配的深层原因。

3.2 功率回路下流量指令产生原理

流量指令的生成根据 DEH 的不同方式，分为 DEH 遥控下的指令，DEH 功率回路投入时的指令，以及 DEH 调压回路下的指令，这里仅讨论功率回路下产生的流量指令，逻辑原理如图 2 所示

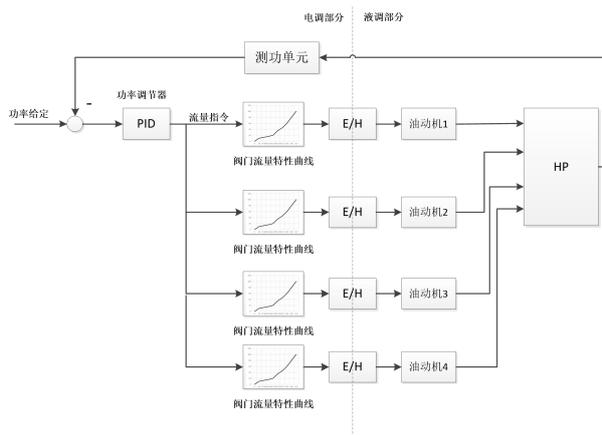


图2

运行人员输入机组功率目标值和负荷速率进行升降负荷控制，功率偏差经过PID运算后形成流量指令，经过各个阀门的流量管理回路转换为阀门开度指令。

3.3 阀门流量管理回路

DEH 阀门管理程序的主要作用是将负荷控制回路输出的流量请求信号变成阀位请求信号，并能在运行人员的干预下，根据机组安全、经济运行和变负荷要求实现在线单阀/顺序阀的无扰切换。在控制方式转换时，要尽量避免阀门的抖动和负荷的波动，做到均衡平稳地转换。为此，要求阀门管理程序在实现方式转换期间，保持通过阀门的总流量不变。流量特性曲线的设置还要考虑到开启方式和重叠度的影响。

在顺序阀控制方式下，各个阀门开度指令并不一定相同（GV1，GV2 同时开启，GV3 再开启，最后 GV4 开启）。当调节汽门是分组顺序开启时，则需要计算出同时被控制的一组调节汽门的最大流量，以便在此基础上根据负荷控制程序计算得到的流量请求值，确定应全开的阀门数；再由全开阀门能通过的总流量与控制要求流量的差值，计算出处于控制状态的阀门的开度，分别送至相应调节汽门的伺服放大器。

在单阀控制方式下，系统为节流调节方式，机组为全周进汽。阀门管理程序先将流量请求值除以调节阀数，得到每个阀的流量请求，再经阀门特性曲线得到阀位指令，送各个调节汽门的伺服放大器。

阀门接受的流量指令实现过程为，阀门流量

指令=单阀流量指令*单阀系数+顺序阀流量指令*顺序阀系数，单阀系数和顺序阀系数之和等于1，在单顺阀切换期间，随着时间的推移，二者以一定速率进行转化。比如从单阀方式切换为顺序阀方式，单阀系数从1开始，历经300s逐渐变为0，顺序阀系数则正好相反，从0开始，历经300s逐渐变为1。也就是说从单阀方式切换为顺序阀方式时，开始时刻，单阀的流量指令占比多，随着时间推移，逐步减弱为0，顺序阀的流量指令则正好相反。同理，从顺序阀方式切换为单阀方式，整个过程正好相反。

设阀门开度指令为 y ，单阀方式对应的阀门开度为 y_1 ，顺序阀方式对应的阀门开度为 y_2 ，单阀系数为 a ，顺序阀系数为 $1-a$ ，功率回路输出对应的阀门流量总指令为 x ，单阀流量特性曲线函数为 $f_1(x)$ ，顺序阀流量特性曲线函数为 $f_2(x)$ ， x_3 是顺阀情况下流量总指令 x 的线性变换，则有下列关系：

$$y = ay_1 + (1-a)y_2$$

$$y_1 = F_1(1.1x)$$

$$y_2 = F_2(x_3)$$

x_3 为四个高调门分别变换的函数，分别称为 $x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}$ ，则有如下对应关系：

$$\text{GV1 的线性变换: } x_{31} = 1.37x$$

$$\text{GV2 的线性变换: } x_{32} = 1.37x$$

$$\text{GV3 的线性变换: } x_{33} = 6.67x - 480$$

$$\text{GV4 的线性变换: } x_{34} = 8.33x - 723$$

图3为GV3的阀门指令生成回路框图，其他调门指令生成回路框图结构和其相同，只是虚线框内线性变换参数不同。

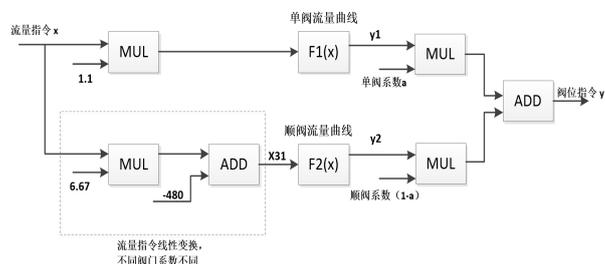


图3

顺序阀的阀门特性函数 $F_2(x)$ 的结构设计四个高调门阀门流量特性曲线相同，通过系数变换拟合合成不同的四个函数曲线，经过简单数学变换，可得到 x 对 y_2 的折线函数，见表1

GV1,2 的流量指令 x	0.00	13.14	27.71	36.75	46.55	65.96	69.89	72.99	76.64	80.29
GV3 的流量指令 x	71.96	74.66	77.66	79.51	81.52	85.51	86.32	86.96	87.71	88.46
GV4 的流量指令 x	86.79	88.96	91.35	92.84	94.45	97.64	98.29	98.80	99.40	100.00
F2(x)	0.00	18.00	37.96	50.35	63.77	90.37	95.75	100.00	105.00	110.00
阀位指令 y_2	0.00	10.30	13.30	16.17	20.20	35.30	45.00	60.00	80.00	100.00

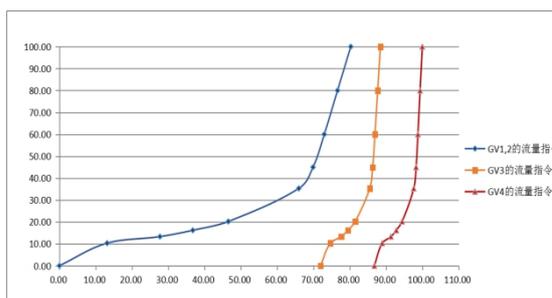
表 1

单阀的阀门特性函数 $F1(x)$ 的结构设计四个换, 可得到 x 对 y_1 的折线函数, 见表 2
 高调门阀门流量特性曲线相同, 经过简单数学变

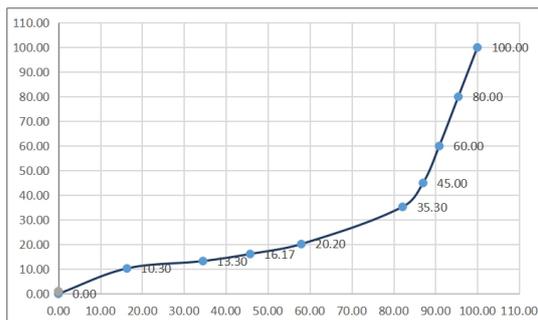
流量指令 x	0.00	16.36	34.51	45.77	57.97	82.15	87.05	90.91	95.45	100.00
$F1(x)$	0.00	18.00	37.96	50.35	63.77	90.37	95.75	100.00	105.00	110.00
阀位指令 y_1	0.00	10.30	13.30	16.17	20.20	35.30	45.00	60.00	80.00	100.00

表 2

经过拟合可得到如下图所示的阀门流量管理曲线



(a) 顺序阀方式下阀门流量特性曲线



(b) 单阀方式下阀门流量特性曲线

3.4 建立数学模型分析

通过前面 2.1 的曲线分析, 已经确定功率波动的原因因为切换过程中四个阀门不同开度产生的流量与期望的流量指令不匹配, 初步判断为阀门流量特性曲线不合理。

但是顺着这种假设, 经过进一步推理, 就会发现一个疑问。那就是为什么功率波动这种情况

只发生在切换过程中, 正常运行中不波动。如果阀门流量曲线有问题, 那么正常运行中也会发生实际流量和需求流量不一致的情况, 进而产生功率或者汽压的波动, 但是正常运行中, 无论 DEH 遥控位还是本地位, 并没有这种情况, 所以阀门流量曲线不合理这种假设并不成立。可以肯定是其他原因导致流量不匹配。

下面通过建立数学模型, 从理论上分析阀门流量不匹配产生的原因, 再结合实际, 通过仿真实验进行验证, 确定问题的真正原因。

根据 2.3 拟合而出来的阀位指令产生公式 $y=ay_1+(1-a)y_2$, 在顺序阀向单阀切换过程中, 单阀系数 a 从 0 逐渐变为 1, 也就是说 y_1 的权重逐渐增加, y_2 的权重逐渐减小, 四个阀门都是如此, 以 GV3 为例进行说明, 顺序阀方式下, y_1 权重为 0, GV3 在全关位, y_2 也应该为 0。也就是说应该随着时间的推移, y_1 权重慢慢增加, y 应该逐步开启, GV4 同理。

但是通过曲线图 1, 可以看到实际的曲线和理论的分析的结论是有出入的, GV3 不是一开始就开启的, 而是经过 129s 后才开始开启, 那么这 129s 内发生了什么? 为什么这段时间不会开启? 于是问题就变成了确定切换起始 129s 内, GV3 的指令为什么没有发出去。

逻辑推理得到的结论和实际发生的情况相矛盾, 有两方面原因, 要么假设条件出错, 要么推理过程出错。经过验证, 推理过程不存在问题,

那么出问题的只能是假设条件了。

整个推理过程的隐含假设条件是，GV3 在顺阀状态下，阀位指令为 0，根据表 1 拟合的函数定义可看出，开启时刻的流量指令是从 74.66%开始定义的，设定定义的一个点为 0 时刻数据，之前的数据，在推理过程中默认其为 0，如果假设条件出错，那么 0 时刻之前的数据肯定不是 0。经过在线仿真验证，发现流量指令没有达到 74.66%时，其输出为一个很大的负数，可确定上述矛盾的产生原因为隐含的假设条件出错。函数 $F2(x)$ 在 0 时刻之前的数值为一个很大的负数，压制住了 $y1$ 的增长，随着时间推移， $y2$ 权重减弱，负数变小，压制作用得以释放， $y1$ 主导作用猛然增强，使得 y 的迅速输出增加，这才是 GV3 在开始 129s 内没有开启的真正原因。

于是问题就变成了寻找 0 时刻之前函数 $F2(x)$ 的输出是负数的原因。

通过仿真试验，可以测得 0 时刻以前的数据，为第一个折线的向前延续，而不是 0。还是以 GV3 阀门流量曲线为例，它的第一条折线函数坐标点为(71.96,0),(74.66,10.3)，顺着他的斜率往前延伸，71.96 之前的输入，对应的输出必定在坐标系的下半平面，即输出为负值。通过计算，输出对应数值确实是第一条折线函数向前延伸

后所得到的数据，这就解释了 GV3 在流量指令为 71.96 之前，输出的为负数的问题了。至此问题的根本原因已找到。

进一步仿真对比其他 DCS 系统的函数功能块，发现新华 DCS 系统、日立 DCS 系统，其函数块 0 时刻之前的数值默认为 0 时刻对应的数值，即从起始定义点(71.96,0)开始，71.96 之前的输入无论是多少，对应输出总是 0，可以理解为具有封口功能，而和利时 DCS 系统的函数块没有封口功能，起始点前输入对应的输出为第一条折线函数向前延伸的数。所以必须通过另外搭设逻辑，来增加函数块输出的封口功能。

按照这个思路，有两种解决方式。第一种方式，对函数 $y2$ 的输出进行上下限制，使其最低输出为起始定义的那个数，对应本问题就是 0。第二种方式，对函数 $y2$ 起始时刻增加一条水平的折线段，这样 0 时刻之前的数值就是水平线的延伸，还是 0 时刻本身，避免切换中压制 $y1$ 的输出。通过仿真试验，证明以上两种方式均行得通，在实际改动时候，采用了第一种方案，修改后进行了功率回路投入时的阀序切换试验，整个过程功率平稳，最大偏差 4.3MW，还是因为一次调频刚好动作引起的，否则功率值和设定值基本吻合，见图 4



图 4

4 结束语

DEH 阀门指令的生成过程比较复杂，调节、保护、试验、仿真等逻辑相互嵌套，问题产生后，具体原因往往不明朗，真正的原因非常隐蔽。文中对实际逻辑进行了部分精炼，从问题的首尾两端着手，利用系统思维，建立整体模型，化繁为简，提取主干，将问题分层拆解，逐步转换，通过采用解决数学问题的的方式，找到解决问题的根本的方法。

本文通过将阀位指令生成逻辑简化为线性方程，将繁琐的流量指令生成问题，转换为分析两个变量相互影响强弱关系的问题，进而发现其中一个变量的变化过程不符合理论预期，再通过分析产生这种现象的原因，发现和利时的函数块封口功能缺失，然后通过试验仿真，以最小的改动，解决了各个阀门流量特性曲线不匹配的问题，是一个比较有借鉴意义的方法论。

参 考 文 献

- [1] 林文孚. 单元机组自动控制技术（第二版）
- [2] 毕贞福. 火力发电厂热工自动控制实用技术

投稿日期：2022-05-20

作者简介：

李丹（1985-），男，河南三门峡，本科，工程师，从事火电厂热工自动化专业