

等效热降法中给水泵出口再热减温水对机组性能影响的再分析

杨海生¹, 石瑞平²

(1 河北省电力研究院 石家庄 050021; 2 石家庄信息工程职业学院 石家庄 050035)

摘要: 给水泵出口再热减温水对机组经济性的影响很大。对经济性的定量分析中, 采用较多的是等效热降的方法。对等效热降中分析给水泵出口再热减温水影响定量分析的公式重新进行了推导, 并与经常使用的计算公式进行了比较, 指出了常用计算公式中的错误。结合具体机组, 给出了给水泵出口再热减温水对经济性影响的算例。

关键词: 给水泵出口; 再热; 减温水; 经济性; 影响; 分析

分类号: TK224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5884(2010)02-0141-03

New Analysis on the Impact of Feedwater Pump Outlet Reheat Spray on Overall Unit Efficiency by Equivalent Power Output Method

YANG Hai-sheng¹, SHI Rui-ping²

(1 Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2 Shijiazhuang Information Engineering Vocational College, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: The equivalent power output method was widely used for analyzing the impact of the reheat spray from feedwater pump outlet on power generation unit efficiency. The formulas used for the analyzing were rededuced and compared with the popularly used formulas, and the errors in popular formulas were described. An example was given for calculation of the impact of reheat spray from feedwater pump outlet.

Key words: feedwater pump outlet; reheat; spray; efficiency; impact; analysis

0 前言

给水泵出口再热器减温水对机组的经济性影响很大, 一般再热器喷水流量每增加锅炉额定负荷的1%, 则机组热经济性约降低0.2%^[1]。

目前再热器减温水对经济性的定量分析中, 通常采用等效热降的方法。采用等效热降计算方法计算时(如文献[2, 3]), 多数依据文献[1]中关于再热减温水定量分析的公式进行计算, 以下简称为常用计算公式。

1 给水泵出口再热减温水对经济性影响的常用计算公式

根据文献[1], 喷水系统示意图见图1。

图1中, (1)表示喷水由给水泵出口分流(高加前)。此再热器喷水份额 α_{ps} , 由于不经过高加及其产生的汽流不经过汽轮机的高压缸而少做功, 如下式:

$$\Delta H = \alpha_{ps} [(h_0 - h_d) - \sum_{r=m+1}^i \tau_r \eta_r^0] \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1)$$

循环吸热量下降:

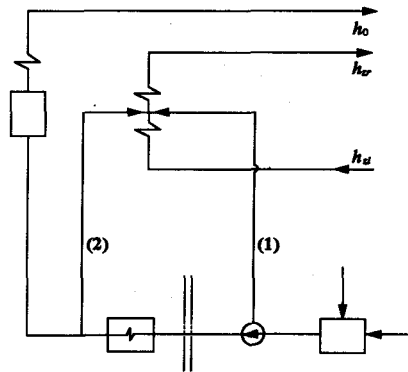


图1 再热器喷水系统示意图

$$\Delta Q = \alpha_{ps} [(h_0 - h_d) - \sum_{r=m+1}^i \tau_r - \sum_{r=c}^i \Delta \alpha_r \Delta Q_{sr-r}] \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2)$$

式中, $(h_0 - h_d)$ 是1kg 喷水由给水焓加热到再热冷段蒸汽焓 h_d 所减少的吸热量; $\sum_{r=m+1}^i \tau_r$ 是喷水份额不流经高加而使循环吸热增加的部分; $\sum_{r=c}^i \Delta \alpha_r \Delta Q_{sr-r}$ 是高加回热抽汽减少, 使再热器流量加大而增加的再热器吸热量部分。

收稿日期: 2008-11-13

作者简介: 杨海生(1974-), 男, 河北井陘人, 工程硕士(在读), 高级工程师, 英国工程技术学会(IET)MIET 会员, 英国工程学会(EC-UK)注册企业工程师, 副主任工程师, 主要研究方向热力发电厂节能及经济性分析、电厂汽轮机及系统调试、蓄冷电力需求侧项目评价等。

再热器喷水引起装置经济性的相对降低:

$$\delta\eta_i = \frac{\Delta H - \Delta Q\eta_i}{H - \Delta H} \times 100\%$$

2 给水泵出口再热减温水经济性定量分析计算公式的再推导

根据等效热降法的概念,对给水泵出口再热减温水的经济性影响进行重新推导。

所分析系统同前。为分析方便,将主汽流量分为两部分,即一部分等于再热减温水流量,另一部分为其余剩余流量。可表达为:

$$F_0 = F_{ps} + F_{sy} \quad (3)$$

式中, F_0 、 F_{ps} 、 F_{sy} 分别表达主汽流量、再热减温水流量及主汽(除减温水外)剩余流量部分。

2.1 系统的吸热量变化

对于未投入再热减温水系统,总吸热量为:

$$\begin{aligned} Q_1 &= F_0(h_0 - h_{gs} + \alpha_x\sigma) \\ &= (F_{ps} + F_{sy})(h_0 - h_{gs} + \alpha_x\sigma) \end{aligned} \quad (4)$$

投入再热减温水系统,总吸热量为:

$$Q_2 = F_{sy}(h_0 - h_{gs} + \alpha_x\sigma) + F_{ps}(h_x - h_{ps}) \quad (5)$$

式(4)~式(5)即喷水前后系统总体吸热量的变化,表示为单位流量的吸热量后,如下式:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \alpha_{ps}[(h_0 - h_{gs} + \alpha_x\sigma) - (h_x - h_{ps})] \\ &= \alpha_{ps}[(h_0 - h_{gs} + \alpha_x\sigma) - (h_d + \sigma - h_{ps})] \\ &= \alpha_{ps}[(h_0 - h_d - h_{gs} + h_{ps}) - \sigma(1 - \alpha_x)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中, h_d 、 h_x 、 α_x 、 σ 分别表示再热冷段焓值、再热热冷焓值、再热蒸汽流量份额及再热段吸热量变化; h_{gs} 、 h_{ps} 表示最终给水焓值及喷水焓值。其它符号含义同前。

喷水自给水泵出口(或抽头)时,存在 $h_{gs} - h_{ps} = \sum_{r=m+1}^i \tau_r$, 则式(6)可转化为:

$$\Delta Q = \alpha_{ps}[(h_0 - h_d - \sum_{r=m+1}^i \tau_r) - \sigma(1 - \alpha_x)] \quad (7)$$

2.2 系统做功能力变化

对于未投入再热减温水的系统,做功为:

$$H_1 = F_0 H = (F_{ps} + F_{sy}) H \quad (8)$$

式中, H 为主蒸汽的等效热降。 H 计算采用下式:

$$H = (h_0 + \sigma - h_n) - \sum_{r=1}^i \tau_r \eta_r^0 - \sum \Pi$$

对于投入再热减温水的系统,做功为:

$$H_2 = F_{sy} H + F_{ps} H_x \quad (9)$$

式中, H_x 为再热热段蒸汽的等效热降。 H_x 计算采用下式:

$$H_x = (h_x - h_n) - \sum_{r=1}^{c-1} \tau_r \eta_r^0 - \sum \Pi$$

式(8)~式(9)即喷水前后系统总体做功能力的变化,表示为单位流量的做功能力后,如下式:

$$\Delta H = \alpha_{ps}[(h_0 - h_d) - \sum_{r=c}^i \tau_r \eta_r^0] \quad (10)$$

式中, $\sum_{r=c}^i \tau_r \eta_r^0$ 仅表示再热冷段及以后的高加吸热而对应的做功能力。

3 常用计算公式与新推导计算公式的比较

3.1 系统吸热量变化的比较

重新推导后的式(7)与式(2)比较,式(2)中的 $\sum_{r=c}^i \Delta\alpha_r \Delta Q_{x-r}$ 项换为了式(7)中的 $\sigma(1 - \alpha_x)$ 。物理意义上, $\sigma(1 - \alpha_x)$ 表示 1kg 喷水直接进入再热器(吸热量为 σ)与未喷水状态(吸热量仅为 $\sigma\alpha_x$)时比较,在再热器中增加的吸热量。

而式(2)中 $\sum_{r=c}^i \Delta\alpha_r \Delta Q_{x-r}$ 项,根据文献[1],表示由于高加回热抽汽减少,使再热器流量加大而增加的再热器吸热量部分。同时根据文献[1], ΔQ_{x-r} 物理意义仅代表纯能量出入系统时,由于排挤再热及以上段抽汽而导致的再热器中吸热量的变化。而喷水减温水性质上属于带工质的出入再热器系统的问题,单位流量 1kg 在再热器中吸热量变化只能是 σ 。因此,式(2)中对单位流量工质再热器中吸热量增加部分,采用代表纯能量出入系统时的 ΔQ_{x-r} 表达是错误的,而式(7)中的 $\sigma(1 - \alpha_x)$ 项能够正确表达再热喷水后单位流量工质再热器中吸热量增加部分。

3.2 系统做功能力变化的比较

再热器喷水份额 α_{ps} ,由于不经过高加及其产生的汽流不经过汽轮机的高压缸而少做功。单位流量 1kg 在汽轮机部分减少的做功能力应该为主蒸汽做功能力与再热热段蒸汽做功能力之差,根据本文推导出的式(10)应为:

$$[(h_0 - h_d) - \sum_{r=c}^i \tau_r \eta_r^0]$$

而在式(1)中,单位流量减少的做功能力为 $[(h_0 - h_d) - \sum_{r=m+1}^i \tau_r \eta_r^0]$, $\sum_{r=m+1}^i \tau_r \eta_r^0$ 表示喷水份额不流经高

加而使系统做功增加的部分。但根据文献[1], $\sum_{r=m+1}^i \tau_r \eta_r^0$ 项仅适用于纯热量进出系统时对新蒸汽等效热降的影响。而再热减温水喷水取自给水泵出口(高加入口时),与系统吸热量变化分析过程类似,属于带工质的出入系统问题,因此,用 $\sum_{r=m+1}^i \tau_r \eta_r^0$ 来表示喷水份额不流经高加而使系统做功增加部分是错误的。

当系统中存在压力低于再热冷段供汽的高加时,式(10)的计算结果与式(1)的结果将存在差异。

3.3 比较结论

基于等效热降法概念推导出的新计算公式,推导过程明晰,具有明确的物理意义;而文献[1]中提供的常用计算公式中,部分组成项违反了等效热降法基本概念,计算公式理论上不能成立。

3.4 计算实例

某 600MW 亚临界空冷机组,采用三台高加、一台除氧器、三台低加的热力系统,其中 1 号高加由高压缸抽汽供汽,2 号高加由再热冷段供汽,3 号高加由中压缸抽汽供汽。其设计工况参数如表 1 所列。

考虑再热减温水由抽汽压力最低的 3 号高加进口(或给

水泵出口)提供,喷水份额为主汽流量1%,按照文献[1]中常用公式及本文中基于等效热降法概念的新推导公式进行计算,结果比较如表2所列。

从计算结果来看,新推导公式的计算结果高于常用计算公式。说明用常用计算公式计算出的结果偏低。

表1 600MW 亚临界机组主要设计参数

项目	主汽焓值 $h_0, \text{kJ/kg}$	再热冷段焓值 $h_d, \text{kJ/kg}$	再热器吸热量 $\sigma, \text{kJ/kg}$	再热流量份额 α_r	单位新蒸汽吸热量 $Q, \text{kJ/kg}$	单位新蒸汽等效热降 $H, \text{kJ/kg}$	循环装置效率 η_i
数值	3 398.6	3 028.5	509.8	0.858 3	2 629.65	1 187.58	0.451 6

表2 喷水减温对经济性的影响比较

项目	等效热降下降 $\Delta H, \text{kJ/kg}$	吸热量降低 $\Delta Q, \text{kJ/kg}$	装置经济性降低 $\delta_\eta, \%$	机组出力降低 $\Delta P, \%$
常用公式	1.943	-1.157	0.207 9	0.163 6
新推导公式	2.332	-1.181	0.241 8	0.196 3

4 结论

(1)对再热减温水取自给水泵出口(或抽头)运行工况,采用等效热降概念及方法对减温水影响机组经济性定量分析的公式重新进行了推导,并与经常使用的计算公式进行了比较,指出了文献[1]中常用计算公式中的错误。

(2)以某一600MW亚临界机组为例,采用新推导出的公式及常用计算公式计算了再热减温水对经济性的影响。结果表明,当再热减温水取自给水泵出口(或抽头)时,采用常

用计算公式计算出的结果偏小。

参考文献

[1] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1994.
 [2] 李晓华. 再热器事故喷水减温对机组运行的影响[J]. 山东电力技术,2002,(1): 53-54.
 [3] 李勤道. 用等效热降法分析喷水减温对电厂经济性的影响[J]. 发电设备,1997,11(1):15.

(上接第98页)

时对轮结构上最大总应变大于0.008 191。轮上高应力区明显变大,塑性区域有较大的扩展。

4.5 计算结果比较

图12是短路工况下,线弹性和弹塑性程序计算得到的最大等效应力比较。图中横坐标为转轴键槽右棱边上轴向坐标,z坐标零点取图10中转轴的右端面。当z坐标小于150mm时,两种计算程序得到的等效应力很接近。当z大于150mm时,线弹性程序计算出的等效应力值逐渐高于弹塑性程序计算应力值。在键槽小端处,即当z为300mm时,两种程序计算结果差别最大。这是因为右棱边上靠近键槽小端处的区域已进入较高塑性区,应力-应变曲线发生改变,而线弹性程序仍按应力-应变本构关系参与计算,得出的等效应力不是实际值。可见,采用弹塑性程序计算能反映材料的实际应力状态。从材料机械性能可知,当结构局部等效应力达到

屈服极限后,并没有到达强度极限,结构材料仍有一定的强度余量。此时,在次同步振动载荷下,经一定次数的交变受力作用,将导致结构疲劳裂纹发生。此外,虽然发生短路工况的时间短暂,结构受到瞬态高应力冲击,也是导致结构产生裂纹损坏的原因之一。

5 结论

计算工况下弹塑性程序计算表明,转轴最大等效应力出现在键槽底部凹槽与键槽右棱边相接处。对轮最大等效应力均出现在凹槽顶部。弹塑性与线弹性程序计算结果一致。

次同步振动发生后,轴上键槽底部凹槽与键槽右棱边相接处、轮上键槽凹槽顶部均出现了塑性区。最大等效应力缓慢升高,塑性变形区域逐渐增大。结构体上裂纹是由多次交变动载荷作用及积累产生,次同步振动、短路冲击载荷是导致结构发生裂纹的重要因素。

在过盈、额定等计算工况下,轮、轴上的最大等效应力先后达屈服限,威胁到结构的运行安全,说明结构强度储备不足,应当适当调整结构设计参数及严格避免发生短路工况。

参考文献

[1] 杜兆刚,张艳春,田明泉. 某发电机前连轴器与轴连接结构应力的有限元分析[J]. 汽轮机技术,2009,51(3):171-174.
 [2] 易日. 使用ANSYS6.1进行结构力学[M]. 北京:北京大学出版社,2002.
 [3] ANSYS帮助文件,3.8.4.2. Using FKN and FTOLN.
 [4] ANSYS帮助文件,Element Library - Solid185 Element Description.

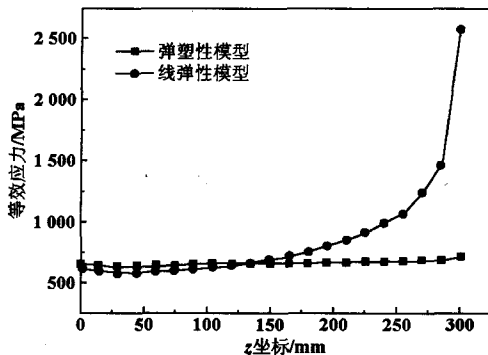


图12 短路工况轴上最大等效应力计算值比较