

百万千瓦级汽轮机启动过程热应力评估与控制

黄 建

（南通天生港发电有限公司，江苏 南通 226003）

摘 要：本文针对百万级机组启动过程，介绍了汽轮机热应力评估机理与控制方式，并提出控制改进建议，为汽轮机安全、快速启动提供依据。

关键词：热应力；评估；控制；改进

0 引言

随着我国火电行业的不断调整与优化，绿色、环保、节能型百万级机组已逐步成为各大电网主力机组。在运、在建百万级机组中，上海电力集团引进西门子技术生产的超超临界中间再热汽轮机占全国百万级汽轮机的份额最大。百万级机组的不断投产，在启动过程中对汽轮机热应力进行科学评估和有效控制，保证汽轮机在各部安全的前提下快速启动，减少设备寿命损耗，降低机组启动成本。

1 汽轮机设备简介

西门子汽轮机总体型式为单轴四缸四排汽，采用 HMN 型积木块组合，包含单流、双层圆筒型 H30 高压缸 1 只，双流、双层 M30 中压缸 1 只和双流、双层 N30 低压缸 2 只，一般配有 100%BMCR 高压旁路和 65%BMCR 低压旁路。

西门子百万级汽轮机技术先进、成熟，安全可靠，其所应用的最新技术近期均有成功业绩，通过这些技术的最优组合，使该机型的总体性能达到了世界一流的先进水平。

2 启动过程热应力评估

汽轮机在启动过程中，金属部件内部将产生较大的温度梯度而由此产生热应力。由热弹性理论可知，部件被连续加热时，会处于热不稳定状态。这种不稳定工况下产生的热应力是影响机组寿命损耗和启动速度的重要因素。在汽轮机各部件中，高中压进汽阀门和高中压汽缸、转子前几级部件的温度变化最为剧烈，所产生的热应力也最大，这也是热应力评估与控制的主要监测部位。

由于汽轮机上述部件的规格和形状比较复杂，因此在计算热应力前，需先进行必要简化，再应用热应力计算公式进行计算。

在弹性模量范围内，热应力值可由 Manson 经验公式计算：

$$\delta_{th}=[E\beta\Delta t/(1-\nu)]*[1.5+(3.25/B)-0.5e^{-1.6B}]^{-1}$$

式中： δ_{th} 应力值；E 材料的弹性模量； β 材料线胀系数； Δt 蒸汽温度与金属温度差； ν 泊桑比，取 0.3；B 波德值。

由公式可知，热应力程度取决于温差大小、蒸汽与金属之间的热量传输及金属部件的几何形状和材质，并且和温差存在严格的线性关系，因此用温差来表示热应力是可行的，也是合理的。

西门子汽轮机通过热应力评估功能（TSE）实现连续的监测并采取相应的控制策略。TSE 将温度差作为汽轮机部件的热应力测量，将测量值与符合热应力范围计算（或试验）出的最大允许温度差进行比较，最大允许温度差和实际温度差的差值称为温度裕度（即温度差的富裕程度，Margin）。温度裕度越大，说明实际温差越小，部件所受的热应力也越小。温度裕度出现负值用于汽轮机降低蒸汽温度或汽轮机负荷。为了确保汽轮机启动时，其热应力处于可控范围，DEH 根据温度裕度的大小自动设置升速率和最大允许的升负荷速率。如果 TSE 出现故障，DEH 将不允许机组启动，并闭锁汽轮机升速或变负荷。

对于纯凝式汽轮机，西门子一般为用户提供主汽门裕度、调门裕度、高压缸裕度、高压转子裕度和中压转子裕度 5 条裕度曲线，分别作为相应部件热应力的判断依据。

典型裕度曲线：高压转子裕度曲线见图 1。

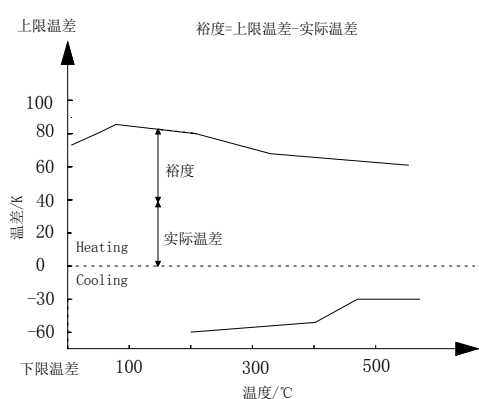


图1 高压转子裕度曲线

3 启动过程热应力控制

西门子 DEH 的一个显著特点及优点是汽轮机启动全过程必须由其提供的程控子组按步序完成，系统未提供运行人员手动操作的界面。

TSE 在对汽轮机启动热应力提供科学评估的同时，也严格按照 X 准则进行控制。X 准则实质是变温度准则，就是根据金属部件不同的温度，确定不同的蒸汽温度，使之与汽轮机金属部件温度匹配，控制温差裕度在 TSE 差值内，从而实现汽轮机在启动过程中的热应力控制，并使启动时间最短、启动成本最低。

西门子蒸汽轮机使用的 X 准则有 7 个，分别是 X1、X2、X4、X5、X6、X7A/B 和 X8。各 X 准则的具体含义如下：

X1 准则：高压主汽门前主蒸汽温度（最小值）大于高压调阀阀壁平均温度某一值，确保开启高压主汽门不会引起调阀冷却。

X2 准则：主蒸汽饱和温度（主汽压力相应饱和温度最小值）应小于主蒸汽控制阀平均阀壁温度某一值，避免主汽门开启后，蒸汽以凝结放热的形式向阀体传递热量而导致热应力超标。

X4 准则：主蒸汽温度（最小值）大于相应饱和温度某一值，用来限制汽轮机冲转前的主蒸汽过热度，避免湿蒸汽进入汽轮机。

X5 准则：主蒸汽温度（最小值）大于高压缸壁温和高压转子温度（最大值）的某一值，避免汽轮机高压部件受冷却。

X6 准则：再热蒸汽温度（最小值）大于中压转子平均温度某一值，避免汽轮机中压转子受冷却。

X7A/B 准则：主蒸汽温度（最大值）与高压转

子/高压汽缸平均温度的差值小于某一值，用以确定高压缸暖机完成。

X8 准则：再热蒸汽温度（最大值）与中压转子平均温度的差值小于某一值，用以确定中压缸暖机完成。

TSE 在热应力控制时除遵守 X 准则外，还必须满足主、再蒸汽过热度大于某一值（亦即 Z 准则）。

西门子 DEH 将上述 X 准则、Z 准则按照汽轮机启动顺序，合理设定在启动程控子组对应步序中。如果设定准则不能满足，程控子组则在一定时限内进行循环等待，超时跳出循环、停止启动。

4 启动过程热应力控制改进

西门子汽轮机热应力评估与控制在机组启动全过程对高压进汽阀、汽缸、转子和中压转子热应力进行了有效的监测与控制，在保证监测部件安全的前提下缩短了启动时间，降低了启动成本。

但在汽轮机启动过程中，一般比较重视高压缸进汽温度与汽缸、转子温度的匹配，不多考虑中压进汽温度与汽缸、转子温度的差值，TSE 在启动全过程未将中压汽缸列入监测与控制范围，同时在冲转暖机阶段未监测、控制中压转子，从而易发生中压进汽温度与中压部件温度的差值超限。例如，某厂在机组冷态启动时，主、再蒸汽温度偏高，再热蒸汽温度和中压部件温度之间的差值较大，机组升速过临界时，短时间进入中压缸的蒸汽流量加大、换热量增强，同时中压缸相对进汽量较小，蒸汽在汽缸中的充满度不好，转子加热明显强于汽缸加热，使得转子温度与汽缸壁温差值进一步增大，造成中压动静部件局部摩擦，引起#4 轴承振动超标，甚至越限停机。

鉴于上述情况的出现，建议 TSE 作适当改进，将中压汽缸列入监测与控制范围，同时在冲转暖机阶段对中压转子进行监测和控制。

5 结束语

目前，西门子百万级汽轮机投产量逐步增加，机组启动频繁，通过深入学习，认真掌握启动过程热应力评估与控制，并对程序控制中未考虑到的主要部件和重要时段进行运行外部干预，确保汽轮机安全快速启动，具有比较现实的意义。

参考文献:

- [1] 上海汽轮机有限公司.1000MW 超超临界中间再热凝汽式汽轮机运行和维护说明书[Z].
- [2] 李世建.西门子大型凝汽式汽轮机启动中的应力控制[J].
电力科学与工程,2009(8).
- [3] 叶绍义.1000MW 超超临界机组汽轮机振动原因分析及
解决对策[R].

作者简介:

黄 建 (1971-), 男, 本科, 工程师, 从事发电厂汽轮机运行技术管理工作。