



大唐东北电力试验研究所
Datang Northeast Electric Power Test & Research Institute

热电联产机组 低压缸切除运行调峰技术分析

大唐东北电力试验研究所

二〇一七年四月

一、前言

为了避免低压转子发生鼓风而过热，热电联产机组中低压缸导汽管蝶阀在设计上在“全关”状态也能够保证低压转子有足够的冷却流量，或者在运行时导汽管蝶阀有最小开度限制（通常是 20%），通常机组低压缸最小冷却流量为 20%机组额定进汽量。

热电联产机组低压缸切除运行就是打破机组低压缸最小冷却流量的限制，通过切除汽轮机的绝大部分进汽，使低压缸在真空条件下安全运行，可改善热电联产机组调峰能力受热负荷制约的问题，做到虽限制发电量但不会影响居民用热需求。

二、热电联产机组低压缸切除改造

1、机组低压缸切除改造内容

图 1 为热电联产机组低压缸切除运行改造后运行示意图，机组进行改造时除了要更换导汽管蝶阀以及导汽管蝶阀加装旁路联通管、调整门、流量孔板外，还需要在低压缸末级及次末级加装排汽温度测点，单台机组改造费用在 300 万元以内。

导汽管蝶阀更换，将中低压缸导汽管蝶阀更换为能够完全关闭的蝶阀，在机组切除低压缸运行时保证其关闭严密。

导汽管蝶阀加装旁路管，低压缸切除运行并不是将进入低压缸的蒸汽完全切断，还需要通入最小限度的冷却蒸汽（丹麦机组每个低压缸仅引入约 7t/h 冷却蒸汽，临河机组引入约 20t/h 冷却蒸汽），为控制进入低压缸冷却蒸汽量，在导汽管蝶阀加装旁路管，同时加装流量孔板、调整门实现对进入低压缸蒸汽量的监测和调整。

2、机组低压缸切除运行控制（临河东汽机组）

- 低压末级叶片温度：报警值： 120°C （投喷水）停机值： 200°C
- 低压次末级叶片温度：报警值： 200°C 停机值： 210°C
- 低压缸排汽温度：正常值：小于 36°C 报警值： 80°C （投喷水）
停机值： 110°C （手动）
- 低压末级叶片温度与低压排汽温度保护逻辑联调，当二者任一温度达到报警值时，应投喷水减温。

三、热电联产机组低压缸切除运行效果

热电联产机组实现低压缸切除方式运行，在供热负荷一定的情况下，不但减少了低压缸做功，而且也减少了高中压缸做功，达到机组深度调峰的目的，其调峰负荷取决于外界热负荷，即“以热定电”。以哈汽 300MW 热电联产机组低压缸切除运行为例，如机组低压缸切除运行后可以连续安全运行，其满足有偿调峰基准负荷下的供热能力如下表所示。

表 1 哈汽 300MW 机组低压缸切除后满足有偿调峰基准的供热能力分析

序号	名称	单位	工况 1	工况 2	工况 3
1	主蒸汽流量	t/h	410.00	535.00	670.00
2	锅炉负荷率	%	40	52	65
3	机组负荷	MW	93.4	120	150
4	中压缸排汽量	t/h	318.66	411.13	514.87
5	低压缸进汽量	t/h	20	20	20
6	机组采暖供汽量	t/h	298.66	391.13	494.87
7	机组供热能力	MW	197.08	258.10	326.56

四、热电联产机组低压缸切除运行安全性

1、小容积流量对汽轮机的影响

汽轮机在小容积流量工况下工作时，和设计工况相比流动特性发生了很大的变化，尤其是大功率汽轮机的最后几级，特别是末级是大扇度和小径高比，流线强烈弯曲，出现逆流区（脱疏区），严重时出现叶片因振动应力增高而损坏，排汽部分因过热而引起可靠性降低等问题。

机组在小流量下运行，低压缸过热或出现大的温度梯度，则会产生变形从而可能引起动、静部分相碰等严重后果。喷水冷却装置工作时，其喷出的水滴，将通过工作叶片根部的涡流，被吸入工作叶片，虽然冷却了工作叶片，虽然冷却了工作叶片，但汽流倒流带入的水滴

将对工作叶片出口边背弧产生侵蚀，增加了不安全因素。

2、丹麦 Nordjylland 机组低压缸切除运行情况

丹麦 Vattenfall 公司 407MW 的热电联产机组在兴建时就考虑了机组灵活性，可实现切除 $2 \times LP$ 低压缸进汽的背压运行方式，每个低压缸仅引入 $1.5 \sim 2.1 \text{ kg/s}$ 的冷却蒸汽，低压缸温度约为 71.1°C 、 139.5°C 。该机组末级叶片能够在 139.5°C 时连续运行，分析认为末 3 级叶片材料经过特殊选择。

表 2 叶片常用材料高温短时力学性能推荐保证值

温度 ($^\circ\text{C}$)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)
20	595	890
100	556	771
200	543	721

3、临河厂机组低压缸切除运行的调研结果

2017 年 3 月 18 日，东汽与西安所联合在临河电厂进行了机组低压缸切除试验，媒体报道试验非常成功。通过到现场调研，了解到临河厂为实现机组低压缸切除运行所进行的改造（具体情况如前所述），但对试验相关参数，尤其是大家最关心的机组低压缸切除运行后新装排汽温度测点的数据保密（是否超过叶片材料高温短时力学性能推荐值还不得而知），咨询现场人员及相关单位专业人员说法不一。借鉴国外机组运行经验，分析认为机组末级叶片处蒸汽温度将在 100°C 以上，长期连续运行存在一定安全风险。

4、制造厂对低压缸切除运行的看法

2016 年 10 月及 2017 年 3 月末到临河厂调研后，东北所就低压

缸切除运行的安全性与哈汽、北重专业人员进行了交流，制造厂的专业人员始终持审慎态度，认为机组低压转子在小流量运行存在颤振、尤其是摩擦过热的风险，不推荐机组采取切除低压缸连续运行方式进行深度调峰。

五、结论及建议

临河厂机组低压缸切除运行试验虽然媒体报道很成功，但我们对机组运行重要参数和细节并不清楚，参考丹麦 Nordjylland 机组运行情况，分析认为机组在低压缸切除连续运行时存在一定安全风险，需要进一步通过试验进行验证。

鉴于机组低压缸切除运行改造量不大，建议选择一台试点机组进行改造，并在下个采暖期与制造厂联合开展试验，根据试验结果评估机组低压缸长时间切除运行的安全可靠性和