

深度催化裂化装置主风机组启动方式分析与比较

赖灵瑞

(中国石化镇海炼化宁波有限公司炼油七部 浙江宁波 315000)

摘要: 主风机组为催化装置关键核心设备, 机组的启动问题关系到装置能否正常开工。由于各厂的实际情况不同, 用户对机组启动方式的选择也不尽相同, 如何选择最合适的启动方式来保证主风机组的平稳启动得到越来越多的关注。本文结合某炼厂新建项目深度催化裂化装置主风机组选型, 对全压启动和变频软启动两种启动方式的优劣势进行了对比分析。总结出了催化装置主风机组启动方式的选择思路, 为催化装置类似机组启动方式的选择提供了参考。

关键词: 主风机组; 电动机; 直接启动; 变频启动

0 引言

随着九十年代国民经济的迅速发展, 对重要化工原料乙烯、丙烯等气体烯烃的需求量日益增长。在石油炼化行业中, 常规催化裂化装置在生产汽油及轻柴油的同时也副产气体烯烃, 但产量较低。国内外主要采用轻质烃类的管式裂解炉从石油烃类制取乙烯、丙烯。采用裂解法制取烯烃, 技术复杂、反应条件苛刻、投资昂贵、能耗大、原料供应有限, 因此为了满足国民经济发展对气体烯烃的需求, 探索新的气体烯烃生产工艺提高气体烯烃产量已成为迫切需要解决的现实课题。石科院探索应用催化剂, 以催化裂解法制取气体烯烃的可行性, 并走出了一条我国独创的催化裂解制取气体烯烃的新路子。

某炼厂新建项目为增加丙烯产量, 计划筹建两套 300 万吨深度催化裂化装置。在催化裂化装置中, 主风机组是催化装置的核心设备, 通过主风机可以将压缩增压后的空气输入到催化再生器当中, 为催化剂再生烧焦提供所需氧气并同时为催化剂流化提供动力风。主风机组(能量回收三机组)通常由: 烟机+主风机+齿轮箱+电动/发电机组成, 高温废气通过烟气轮机(简称烟机)膨胀做功可回收大部分的烟机能量以达到节能降耗的目的。

1 机组配置介绍

1.1 主风机组配置

因深度催化裂化装置反应深度更深, 原料裂解更彻底, 反应压力相对流化催化裂化更低, 与同规模的 FCC 装置相比, 烟气体积流量相对更大。该装置所产生的烟气体积流量已超过目前国内最大的烟气轮机的处理能力。

综合考虑诸多因素后, 机组设置采用以下方案:

两套烟气能量回收机组并联操作+一套备用主风机机组。能量回收机组采用两套机组并联的操作方式, 正常操作时, 每套风机提供的风量为 50%。两套能量回收机组参数相同。

即每套 300 万吨深度催化裂化装置, 设置 2 套主风机机组, 机组配置形式: 主风机+烟机+齿轮箱+电动/发电机; 以及 1 套备用主风机机组, 机组配置形式: 备用风机+齿轮箱+电机。轴流风机的型号为 AV63-11, 轴功率 10083kW, 转速 5200rpm; 烟机的轮盘直径

为 $\phi 960\text{mm}$, 输出功率约 11000kW; 齿轮箱, 传递功率 16000kW; 电机容量为 10kV, 16000kW。

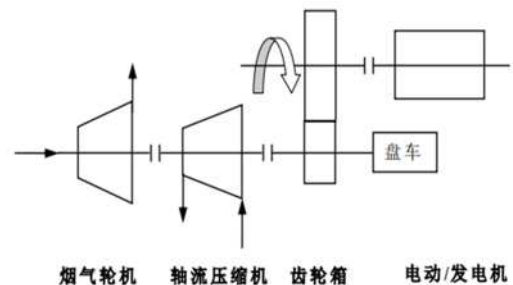


图 1 能量回收三机组

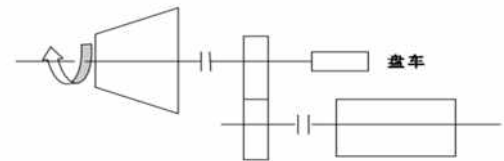


图 2 备用主风机组

1.2 主风机组电动机介绍

为满足装置开工时所需的风量, 除启动备用主风机机组外, 还必须开启一台主风机机组(能量回收三机组)向装置供风。主风机组的异步电动机启动特性必须考虑主风机、齿轮箱及烟机的启动阻力矩。保证电动机启动转矩超过负载的阻力矩。(下图 3 为机组厂家计算的启动参数)

催化主风机电机启动需满足以下三点要求:

(1) 电动机启动过程, 两端电压稳定在一定范围, 实现有效的启动转矩带动负载, 电机启动转矩曲线(启动端电压下)大于负载阻力矩曲线 10%, 同时保证对配电系统电压的冲击不能影响用电设备正常运行;

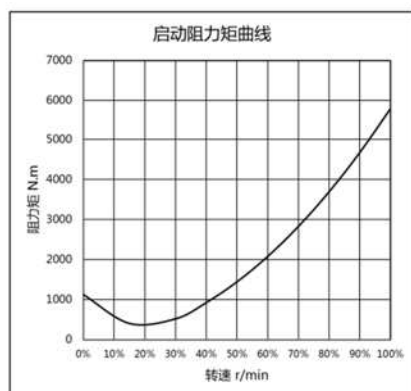
(2) 生产装置的大功率电机, 因其电气特性, 启动时将给所在电力系统电压造成冲击, 拉低母线电压, 对其他送电负荷正常运行构成威胁, 根据《SH_T 3038-2017 石油化工装置电力设计规范》规定, 要求电机频繁启动时, 母线电压不低于 90%, 不频繁启动时, 不低于 85%。

(3) 电机启动热容量满足启动时间要求,即完成启动时间小于该条件下的电机运行启动时间。

因此,常采用高压变频软起、线变组单独母线直启、降压软启动、液态软启动等启动方式,完成启动后切换至工频运行。

压缩机本体启动参数及曲线
(第一级静叶片开度 22°)

额定转速:	5200 r/min
启动力矩:	5767 N·m
静力矩:	1124 N·m
转子 GD ² :	1602 kg·m ²



主风机(含烟机)折算到电机端:

$$GD_2=27500 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

$$\text{静力矩}=7600 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\text{启动力矩}=26000 \text{ N}\cdot\text{m}$$

备用主风机折算到电机端:

$$GD_2=22500 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

$$\text{静力矩}=6200 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\text{启动力矩}=22000 \text{ N}\cdot\text{m}$$

图3 某厂主风机组启动参数及曲线

2 主风机自启动流程介绍

通常在国内催化装置主风机组配置为一开一备。开工时,先启动备用主风机组,待三旋出口烟气合格进入烟气轮机,驱动主风机,最后启动电机拖动机组至额定转速运行。然而本次深度催化裂化装置主风机组配置为两开一备,当只启动备用主风机 K102 时,风量只有 50%,达不到催化剂装剂流化需求风量,因此必须启动一台主风机机组 K101A(或 K101B,暂按 K101A 描述)来提供装置需求的剩余 50%风量。此过程中装置无达标烟气, K101A 烟机无烟气进入,烟机状态为通入少量冷盘冷却蒸汽进行冷却,出口放空。在机组

K101A 启动过程中,烟机不仅不做功,而且还是一个比较大的负载。催化剂装剂流化、升温、喷油、烧焦至三旋出口烟气达标至少需三天时间,烟气达标之后,再将烟气引入 K101A 烟机;此时可以根据需要将烟气引入 K101B 烟机进行冲转,带动 K101B 主风机启动,机组运行正常后,可以将备用风机 K102 切出装置,装置正常运行。当主风机组异常需要切出时,备用主风机投入运行。因此,烟机需保证在冷态下短时达到全转速启动及无烟气进入情况下长时间空转的性能。下表 1 为主风机组两种配置方法启动流程的过程对比。

表 1 启动流程比较

启动流程比较	步骤一	步骤二	步骤三	步骤四	步骤五
一开一备配置启动流程	启动备用风机	风量足够,待烟气达标	烟气达标,烟机冲转,启动主风机组	备用风机切换至主风机组	——
两开一备配置启动流程	启动备用风机	电机直接启动主风机组 K101A(带烟机),提供足够风量,待烟气达标	烟气达标,烟气缓慢并入主风机组 K101A 的烟机	烟气进入主风机组 K101B 的烟机,进行冲转,启动 K101B 主风机组	备用风机切换至主风机组 K101B

3 电动机启动方式介绍

催化主风机组启动力矩较大,稳定运行要求高,并且需满足在启停过程中具备短时间内再次启动的要求。

目前大电机启动的方式主要有:1、降压软启动;2、液态软启动;3、高压变频软启动;4、全压直接启动;5、其它方式。如采用拖动电机或汽轮机拖动。

降压软启动是通过降低电压牺牲启动转矩的一种软启动方式;液态软启动装置液阻箱的电阻值在不同环境下并不相同,导致其稳定性较差,另外由于一次启动完成后,电解液处于高温状态,不能

实现连续启动,必须等电解液的温度降低到一定范围内才能再次启动。因此目前催化主风机组常用启动方式采用高压变频软启动或线变组单独母线直启,部分装置采用汽轮机驱动。

通过调研国内近十年共 90 台套催化主风机组启动方式,采用变频软启动方式的有 74 台套,汽轮机驱动 4 台套,直启的 12 台套;其中 4 台为烟机启动后再启动电机,6 台为备用风机直接启动,带烟机直启的电机机组仅有 2 台套。结合前期咨询烟汽轮机厂家,确认烟机在无烟气进入情况下允许直接启动与运行,以下对变频软启、线变组直启两种方式进行分析:

3.1 变频启动方式分析

3.1.1 基本原理

通过采用变频器,改变加在主风机组电机上的电源电压、频率,实现平滑无冲击的启动。

变频器主要由整流、滤波、逆变、制动单元、驱动单元、检测单元及微处理单元组成,智能化程度高,功能齐全,但成本高。它把电压和频率固定不变的工频交流电转换为电压或频率可变的交流电提供给电动机,达到限制启动电流、降低启动压降的目的。可以

使启动电流从零开始变化,最大值不超过额定电流,减轻了对电网的冲击和对供电容量的要求,也可以延长设备的使用寿命。

主风机组若采用一拖二变频软启动,单独母线选用 35kV/10kV 即可(下图 4)。因变频器软启动装置电压和频率都能连续可调,可保持主风机的电动机具有较小的转差率。变频软启动装置可保证启动转矩足够大(超过阻力和负载转矩之和),启动电流从零开始变化,且最大电流不超过额定电流,减轻对电网冲击。

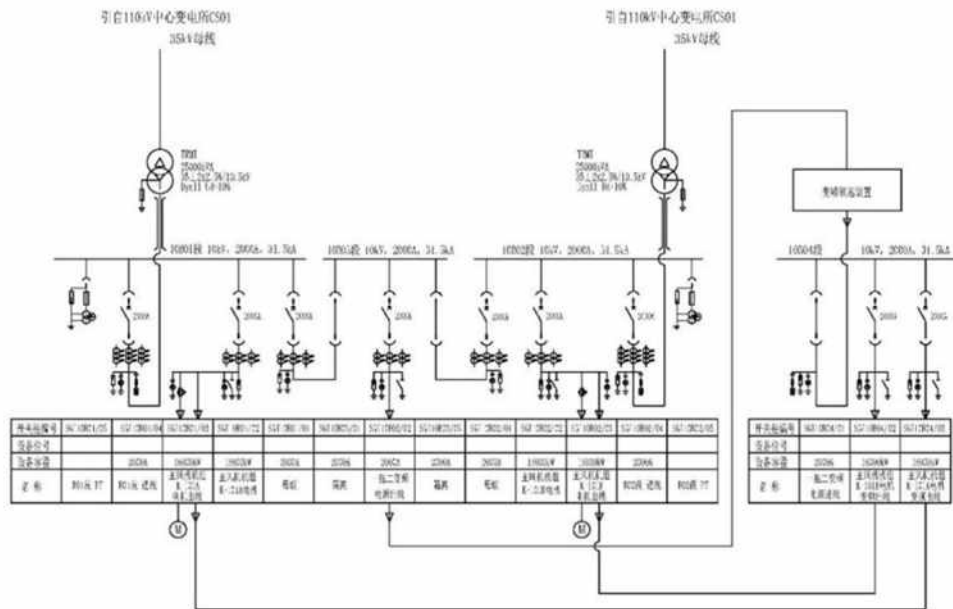


图 4 一拖二变频启动方案

3.1.2 综合分析

(1) 维护成本: 高压变频器属于电力电子设备,需要定期预防性维护,常规检修周期为 4 年左右,检修时需要更换风扇、交直流电容等元器件。其中,功率模块无法通过预防性维护提高使用寿命,推荐定期更换,然而更换功率模块成本很高(如 PX ABB ACS2000 功率模块 20 万/个,专业厂家人员费用 8000 元/天左右),4 年平均需更换功率模块 2 个。

(2) 维护难度: 高压变频器故障发生具有突发性和隐蔽性;并且维护技术难度高、核心技术开放程度低,复杂故障需厂家技术人员支持。

(3) 主要优点: 调节容量范围大、调速范围大和调速精度较好,能够适应比较严苛的调速要求;调节效率高,具有一定的节能效果;采用 35kV 变压器组带电动机+高压变频方式启动设计,能保证大转动惯量的主风机平稳启动,同时对电网的冲击较小,启动完成后变频器退出运行长期备用,机组两开一备。

(4) 主要缺点: 使用寿命较短,维护要求高,一般高压变频器稳定运行周期为 5-8 年;运行环境要求高,对温度、湿度、粉尘非常敏感;维护成本高,高压变频器功率模块稳定运行周期一般为 4 年左右,且模块无法通过预防性检修提高寿命(需要定期更换),后

期更换模块成本高;可靠性不如线变阻直启;备品备件储备困难、价格高、无法做到一一储备,且电力电子元件的寿命也有限。

3.2 直接启动方式分析

3.2.1 基本原理

直接启动又称全压启动,其连接方式较简单,通过电动机定子绕组接线柱直接与额定电压连接启动。该启动方式所需启动电流非常大,达到额定电流的 5~7 倍,全压启动的转矩约为额定转矩的 0.5~2.0 倍,增加了机械结构的磨损,甚至损坏设备^[1]。主风机组选用 10kV 电动机,采用 35/10kV 或 110/10kV 变压器带单独母线直接启动电机。上级系统电压因变压器阻抗,将电压降限制在允许范围,确保对运行负荷无较大影响。

由于电机的定子热容量较大,电机启动时间比较短,定子绕组在启动过程中的温升很低,因此,在计算电机启动温升时没有考虑定子绕组的温升。当导条和端环等效电阻、质量和比热容都一定时,启动电流越大,启动电压越小,则启动电阻越小,从而越小,等效电阻越大,从而温升越大。主风机电机启动过程中电流越大,启动时间越长,则电机转子绕组温升越大,增加电机烧坏的风险。

3.2.2 直接启动应用情况

经过国内石化行业调研了解,通过电机直接驱动能量回收三机

组启动的厂家目前仅有两家，一家为美国引进设备，另一家机型略小，为 AV56-10；某石化厂于 1994 年对催化裂化主风机组进行了扩容改造，因机组功率匹配失误的原因无法直接带动烟机与主风机启动，后续经过多次检修改造。机组功率匹配失误是因机组理论计算值与实际运行值偏差较大，无法精准计算启动过程机组阻力矩，导致电机选型偏小^[2]。

3.2.4 综合分析

(1) 维护成本：投运后结合检修周期进行检修，依托检修作业指导书、维保单位进行定时性维护，维护成本较低。

(2) 主要优点：启动时间短、启动形式简单、成本较低；设备维护简单，实际影响运行的故障率低；

(3) 主要缺点：电流过大发热严重，容易损坏电动机绕组，引发火灾；转矩变化过快容易损伤电动机轴承和变速齿轮，长期运行将导致机械性能不断降低；启动过程可能导致电网电源骤然快速降低，可能触发其他电网内设备低电压保护装置，以至于发生跳闸现象；若为了克服大功率电机的冲击，电网电源增大配电变压器的装载容量，会导致成本投入加大，也会使变压器运行中铜损和铁损加剧，进而消耗更多电能源和电费；无法准确计算主风机组及烟机启动过程中的阻力矩，存在实际启动过程中无法启机的风险。

4 启动方式对比分析

4.1 根据项目计算分析情况，总结出部分数据及结果如表 2 所列。

表 2 启动方式对比

序号	比选项	高压变频软启动（一拖三）	线变组直启（三台主变）
1	单独母线	35kV/10kV	110kV/10kV
2	启动功率	小功率启动	正常功率启动
3	启动风险	无	存在无法启动风险
4	启动电流	较小	大
5	电机（变压器）容量	20MVA	40MVA
6	变压器空间	8.5×9 米	9×12 米
7	电缆	三芯	单芯
8	维护成本	人员 1.6 万/次；功率模块约 20 万元/个；风扇 5 万/个	无
9	维护难度	后期故障率高、维护成本高	后期故障率低、维护简单
10	维护策略	4 年换风扇，8 年换 50%模块，12 年整体更新	定期检修
11	预计寿命	不超过 12 年	20 年以上
12	启动时对系统的冲击影响	无影响	骤然拉低系统电网压力
13	故障可预见性及后果	不可预见性，故障一般突发，影响全部主风机开启	一般无故障，变压器故障后不影响其他风机直启
14	故障恢复速度	备件完好情况下 2 小时恢复	未遇故障
15	设备占用空间	5400*2400*1400 加开关柜	——
16	投资总价	1700W	1527W
17	投资 预估 费用 分解	10kV 开关柜	253W
18		110kV 开关柜	0
19		35kV 开关柜	36W
20		110/10kV 变压器	0
21		35/10kV 变压器	321W
22		110kV 电缆	0
23		110kV 电缆头	0
24		35kV 电缆	86.4W
25		35kV 电缆头	4.2W
26		高压变频器	进口 1000W
27		电容	0

(1) 采用变频软启动方式，优势在于可选取电压略低的单独母线，实现小功率启动，启动电流较小，对系统无冲击影响，可选用

容量较小的变压器。但投资相对较大,且后期维护成本与难度相对较大。

(2) 采用直接启动方式,优势在于操作简单,故障率低,后期维护成本及难度较小。但直启所需母线电压较大,启动时存在拉低电网压力的风险,启动电流较大,对电网冲击较大,并且在无法准确计算主风机组启动阻力矩的情况下,存在机组启动过载,无法启机风险。备用主风机组可计算机组启动阻力矩,采用直接启动方式。

5 备用主风机组电机直接启动计算验证

(1) 备用主风机组电机参数核算

备用主风机组电机根据如下负载阻力矩及转动惯量参数,进行启动核算:

表 3 备用主风机组电机参数

	功率 (kW)	电压 (V)	转速 (rpm)
备用主风机组电机	16000	10000	1488

表 4 高、低速轴启动参数

	重量 (kg)	GD2 (kg.m ²)	静阻力矩(N.m)
高速轴	657	25.5	177.06
低速轴	4428	2371.95	1424.56

折算到电机端力矩参数:

折算到电机端(不含电机)启动阻力矩: 22000 N.m;

折算到电机端(不含电机)静阻力矩: 6200 N.m;

折算到电机端 GD2:22500 kg.m²。

(2) 电机启动过程曲线计算分析

如下图 5 曲线所示,经核算备用主风机组电机在端电压保持在 73% 额定电压启动时,电机最低加速转矩可达到电机满载转矩的 18%,符合 API 541 标准要求的电机加速力矩需不低于电机额定转矩的 10% 要求。

如下图 6 所示,当电机端电压保持在 100% 额定电压下启动时,启动时间约 17 s,当端电压保持在 73% 额定电压启动时,启动时间约 39 s;在端电压不低于 73% 额定电压下,电流-加速时间曲线均与电机热态及冷态热限制曲线保有足够的安全裕度。

综上,经计算分析确定本项目备用主风机组电机可以满足直接启动条件。

6 结论

(1) 能量回收三机组启动方式:直接启动虽接线简单,启动灵活,操作维护方便,对长周期运行有保障,但考虑到直启存在开工过程中能量回收三机组无法直接启动的风险,变频软启动具有业绩多、经验丰富、操作成熟的优势,最终选择能量回收三机组采用变频软启的方式。

(2) 备用主风机的启动方式:当两台运行中的烟机有一台因缺陷需要切出检修时,要求备用风机能直接启动,不会因变频器或 PLC 故障而受影响。考虑备用风机需要的启动转矩相对较小(与主风机相比缺少烟机转轴),直接启动安全性高,因此备用风机按电动机/变压器组直接启动方式设计,以实现二开一备不停工切机的目标。

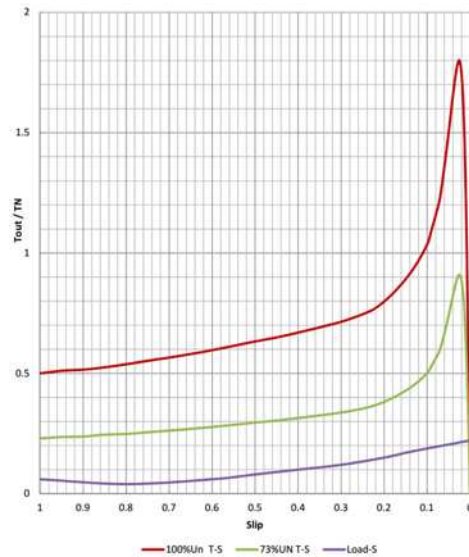


图 5 电机对应的转矩-转差率曲线

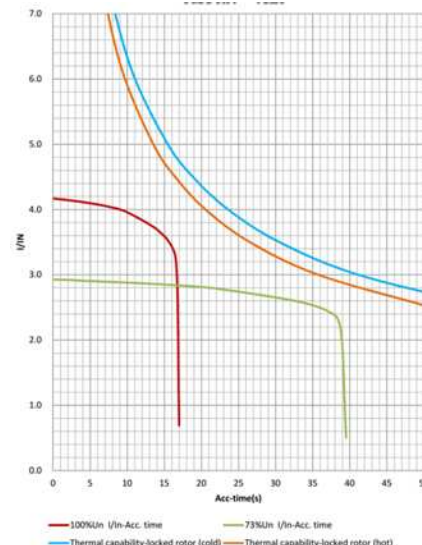


图 6 电流-启动时间曲线及热容量曲线

综上,为保证装置长周期可靠运行,主风机组启动方式选择“变频一拖二软启动”两台主风机/烟机机组,线变组直接启动备用主风机组。

通过对深度催化裂化装置主风机组启动方式的综合分析比较,确定本次项目催化主风机组的启动方式。待后续项目建成,机组投入运行,将结合主风机组实际启动运行过程进一步总结提升,为设计院以及用户正确选择主风机组电机启动方式提供参考,促进行业内催化主风机组启动方式及过程的不断优化完善,推动深度催化裂化装置的健康快速发展。

参考文献

[1] 宁国云, 袁佑新, 黄声华, 等. 大型电动机软启动装置性能分析与比较[J]. 电气传动, 2011, 41(8):6.
 [2] 董仲轩. 催化裂化主风机组启动试验和改造失误分析[J]. 炼油设计, 1999, (09):18-22.