

乙烯裂解炉风机电机共直流母线变频系统应用分析

文/于世翔

中国石化工程建设有限公司

裂解炉是乙烯装置的核心关键设备，其安全运行直接影响到乙烯装置正常生产。通常乙烯装置建有多台裂解炉，每台炉配有一台大功率风机。风机通常采用变频调节方式。随着乙烯规模不断增加，风机电机功率也随之增大，其稳定运行对于乙烯装置生产过程的稳定性、安全性和可靠性都起着越来越至关重要的作用。传统的单变频型式，即一对一变频驱动型式在可靠性方面需要进一步提升，同时也需要提高安全性。从变频器原理、关键技术的发展及石化行业电气系统进行探究分析，提出新一代乙烯装置乙烯裂解炉风机变频系统的开发及应用分析，以明显提高乙烯装置裂解炉风机运行的稳定性与安全性，减少因裂解炉变频器事故造成乙烯装置及全化工装置联锁停车事故风险，提升乙烯装置生产过程的安全性和稳定性。

乙烯是石化行业重要核心装置，其规模越来越大。乙烯装置的关键设备裂解炉风机电机功率也随之增大，对变频器的要求也越来越高。其稳定运行对于乙烯装置生产过程的稳定性、安全性和可靠性都起着越来越至关重要的作用。

传统乙烯裂解炉风机电机采用一对一变频驱动的单传变频型式，在石化生产过程中逐渐不适当前的发展，面临着一些新的问题。如电机功率增大致使变频器容量变大，变频器选型越来越困难；乙烯规模变大，事故情况下经济等各方面损失变大，从而要求减少故障，对电机平稳运行的安全、可靠性要求更高等。

为了解决这些问题，乙烯装置需要更新、更可靠的裂解炉风机电机变频驱动系统。

概述

石化行业变频器通常采用单传模式，乙烯裂解炉风机电机变频器亦采用此方案。而面对乙烯规模

变大，此方案面临越来越多的问题，成为稳定运行的安全隐患。

本文通过分析变频器结构特点，与石化行业电气系统相结合，探索新的模式，从而提高裂解炉变频驱动安全性与稳定性。

裂解炉风机电机变频简析

1. 单传变频器分析

石化行业变频器通常采用单传模式。其特点是一对一驱动，变频器与其他负荷一起由同一低压系统提供电源。

其优势在于经过长期实践，有多种质量可靠的成熟产品可供选择；单传模式下设备结构简单，标准化结构，内部配件可维修替换；各企业长期使用，有一定使用维护经验。

劣势在于：①由于单机运行，故不能解决单机运行时设备内部各子系统的故障问题。设备故障率取决于各子系统最高故障率，即任意子系统损坏都

会影响变频器的运行；②未能从系统环节上保障变频器运行的可靠性。

因此，面对新的问题，需要结合石化行业特点采用新的变频驱动型式。

2. 乙烯裂解炉变频发展

随着乙烯装置由80万t向165万t甚至更大规模发展，裂解炉风机电机功率也随之增长，与之配套的变频器容量也相应变大。

鉴于风机变频器数量多，功率大，在常规方案下变压器容量已无法满足同时为多台风机电机和其他负荷供电的需求。此外，大功率变频器向电网反馈的谐波干扰较之前增多，影响到电网和其他负荷的安全运行。裂解炉风机变频器已不适合和其他负荷一起由同一双电源单母线分段系统供电。

由此，将裂解炉风机负荷独立出来，由单独的单母线分段系统供电。由变压器、单母线分段接线、变频器及消谐设备等组成，其结构原理如图1所示。

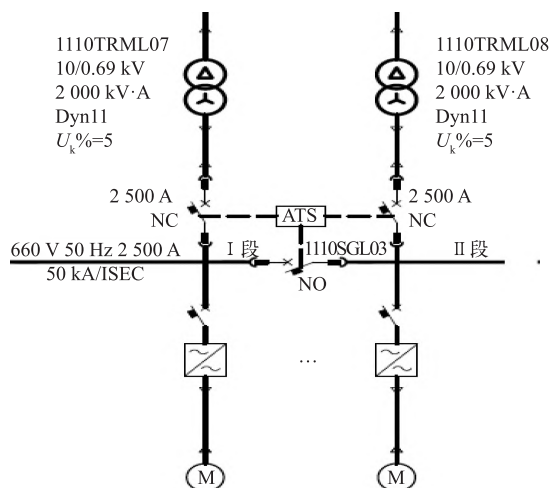


图1 单母线分段供电

这种方案优势在于：①电源系统由单母线分段构成，可靠性高；②由于只负责为裂解炉风机变频器提供电源，变压器可根据风机电机负荷合理配置容量，可以更好地满足乙烯裂解炉变频器数量大、容量高的需求；③便于集中对变频器发出的谐波进行治理，消除了对电源系统及其他用电负荷的干扰；④便于日常的维护与管理。

这种方案劣势在于：①未改变裂解炉风机变频器单机运行的状况，设备的故障率未能有效降低；②由于变频器可靠性不高，且没有冗余配置，发生故障势必影响装置生产运行；③随着变频器所需容

量越来越大，发生故障所产生的风险和损失程度也有所提高，对乙烯装置的安全平稳运行产生不可忽视的影响；④晃电或电源短时停电时，变频器将会停机导致电机停车，影响裂解炉的生产运行。而因失电造成变频器停止工作，直接影响到装置的持续稳定运行，会造成重大经济损失。

结论如下：

- 1) 单传型式变频器作为乙烯裂解炉变频器在使用中日渐力不从心，无法满足日益增长的需求。
- 2) 随着乙烯规模日益增大，变频器的安全性问题日益突出，成为影响乙烯装置平稳运行的关键因素之一。
- 3) 单传变频器与双电源单母线分段系统的组合解决了供电容量和谐波干扰的问题，但未能从根本上解决裂解炉风机电机变频驱动可靠性问题。
- 4) 应从系统的角度重新架构电源与驱动问题，以便更好为乙烯裂解炉变频传动系统的安全稳定运行服务。

变频器共直流母线多机传动驱动技术方案

1. 变频器的基本原理

单传型式变频器有两种组成形式，分为交-交变频器和交-直-交变频器。目前，多数情况下使用的是交-直-交变频器。

交-直-交变频器拓扑原理是整流单元将工频交流电转变为直流电，然后再通过逆变器将直流电转变为可控的交流电以实现调频驱动的目的。结构原理图如图2所示。

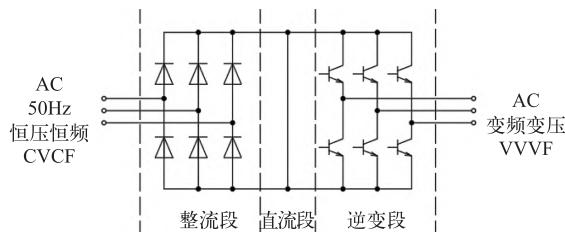


图2 拓扑结构原理

目前，除在石化行业广泛使用的单传模式外，还有多传模式。多传模式指多台变频器的直流部分采用公共直流母线，再由多台逆变模块分别驱动电机，即一带多模式。当电源或整流段发生故障时，会影响整个多传系统的运行。这种模式多用于冶金船舶等对负荷等级要求不高，对干扰等不敏感的行业。

由此可知，单传型式变频器（交-交变频器和交-直-交变频器）和多传型式变频器，存在可靠性方面的固有缺点。

2. 变频驱动系统化方案-共直流母线变频系统

鉴于单纯的从个体设备角度考虑变频器已无法适用新的要求，需要基于石化行业电气系统的特点，对变频方案更深一步进行工程化探索研究，从系统角度出发解决面临的问题。

单传变频器与双电源单母线分段系统的组合虽未能改变单传结构，但却是裂解炉风机变频系统化的初始架构。结合现有技术和工程经验，本文提出新的工程化方案，即共直流母线变频系统方案。此部分的特点如下：

1) 采用两套独立的模块化整流单元，使整流单元构建成冗余模式，为直流母线段供电，组成双电源进线单母线结构。由于通过整流后的母线段是直流，根据直流特性省略了传统交流方案下的分段开关，故取消相对复杂的ATS系统或快切系统，从而可以获得比单母线分段更高的电源切换速度，以及更低的故障概率。通过系统化的工程配置，可以大大提高整流单元及直流单元的稳定性及可靠性。

2) 由于采用了直流母线，可以在母线上采用储能设备，如超级电容等，以满足抗晃电要求，从而充分发挥直流系统柔性优势。

3) 输出单元采用独立逆变器，为裂解炉风机电机供电。同时，为提高可靠性，可以配置双逆变器，以保障故障时变频驱动及时切换。进而保障电机运行的稳定性。

结构原理如图3所示。

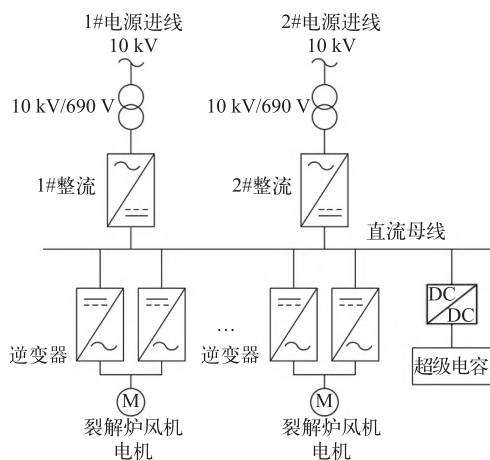


图3 共直流母线变频系统原理图

3. 方案比较

共直流母线变频系统特点之一是两组并列运行的大容量整流单元。常规上，整流器可以采用二极管、晶闸管（SCR）及IGBT等元件。但二极管整流器属于不可控整流器，较不稳定，鉴于石化装置对稳定性要求较高，本文中整流段方案仅考虑晶闸管（SCR）与IGBT整流器。

根据整流/逆变型式的不同，配置出以下两个方案。

3.1 方案一：晶闸管（SCR）整流

(1) 方案概述

用电需求为多台乙烯裂解炉风机电机。

系统采用10 kV双电源进线。

整流变压器采用两台10/0.69 kV 24脉整流变压器并列运行。整流变压器输出4路三相AC 690 V对整流器进行供电。

整流器采用晶闸管（SCR）整流。经过24脉整流后，网侧谐波含量小于5%。

两套整流器分别将交流电整流为直流电，接入同一条直流母线。组成整流变压器+晶闸管整流器并列冗余的结构，满足了用电设备对电源的要求。

逆变器根据电机实际需求，将直流母线能量转换为相应的交流输出，为电机运行提供所需的能量及转速调节等控制；逆变器根据工程需求可配置双机冗余。

此外，基于直流母线特性可进行供电稳定性扩展，如：配置超级电容，可通过DC/DC变换装置，为直流母线提供储能，以躲避晃电。

方案一原理图如图4所示。

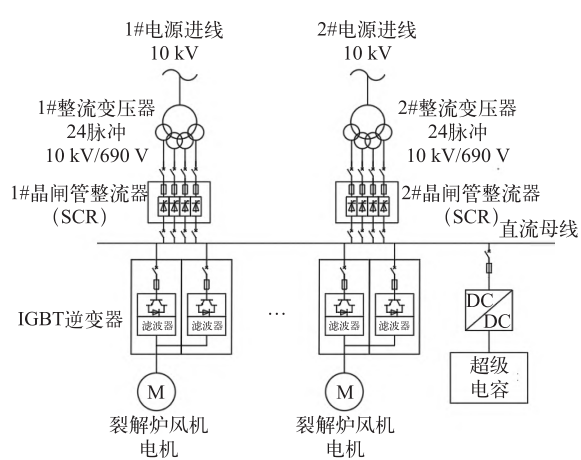


图4 方案一原理图

(2) 主要设备描述
方案一设备列表见表1。

表1 方案一设备

序号	名称	描述
1	整流变压器	10 kV/690 V 24脉波
2	低压配电柜	690 V，4路
3	整流柜	SCR整流，配直流隔离开关
4	逆变器	冗余配置,IGBT逆变器
5	DC/DC高频电源	配置斩波模块及直流开关
6	超级电容柜	电容柜，充放电柜
7	裂解炉风机电机	

整流变压器：为提高整流效率、整流设备的脉波数，及减少谐波污染，选用24脉冲整流（移相）变压器。

整流器：本方案采用大功率三相半波晶闸管，将交流电源整定为直流电源；此外，利用晶闸管高频开关的特性，有效降低谐波对电网的影响；同时，可获得比二极管更高的整流效率与整流效果。采用冗余配置。

逆变器：逆变器采用IGBT器件，将直流电转换为频率、幅值、相位和电流可控的交流电源，为电动机供电，采用冗余配置。

DC/DC模块 DC/DC模块，是将持续变化的直流电源，斩波整定为电压恒定的直流电源；通过DC/DC模块，可以有效减少超级电容的容量，采用冗余配置。

超级电容：超级电容是一种介于传统电容和电池之间的能量载体，具有充电时间快、瞬间放电电流大、能量密度高和循环寿命长的特点，非常适合瞬间大功率放电应用的现场。

3) 方案分析

在本方案中，整流变压器与低压配电柜及晶闸管整流柜串联构成电源进线，而两套电源进线及单母线共同组成双电源进线单母线结构，满足工艺用电负荷对电源的要求。

同时，由于母线段采用直流，依据直流特性，母线段较交流的双电源进线单线分断结构可以省略分断用断路器及复杂的ATS或快切等一二次设备，也可以根据工程需要保留母联开关，仅作为开合使用。

此外，因为汇接于直流母线上的两路并列电源是直流电，且整流器采用的是三相半波整流，可以

调节输出电压。工作状态下，两路并列电源同时运行，在控制器调节作用下可以同时输出直流电，且不会向电网发出环流。在一路电源故障切除时，可以实现无扰动零秒切换，具有比普通交流系统更快的切换速度。连接在母线段上的超容，在发生晃电事故时，可以确保直流段上母线电压平稳。也可以在日常的运行中为直流母线削峰填谷，使系统获得更平稳的直流电源。

双逆变器变频为裂解炉风机电机提供电源，使在负荷侧解决了电源冗余问题，提高了电源的可靠性。

3.2 方案二：IGBT整流

(1)方案概述

用电需求为多台乙烯裂解炉风机电机。

系统采用10 kV双电源进线。

变压器采用两台10/0.69 kV变压器并列运行，电压转为690 V交流电。

IGBT整流器采用AFE可控整流器，整流后网侧谐波含量小于5%。

两套整流器分别将交流电整流为直流，接入同一条直流母线。组成变压器+AFE可控整流器并列冗余的结构，满足了用电设备对电源的要求。

逆变器根据电机实际需求，将直流母线能量转换为相应的交流输出，为电机运行提供所需的能量及转速调节等控制；逆变器根据工程需求可配置双机冗余。

此外，基于直流母线特性可进行供电稳定性扩展，如：配置超级电容，通过DC/DC模块，为直流母线提供储能，以躲避晃电。

方案二原理图如图5所示。

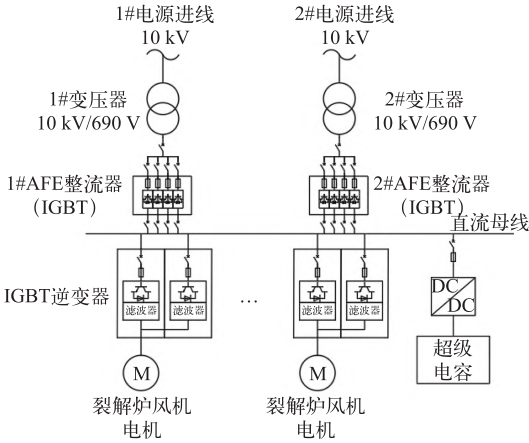


图5 方案二原理图

2) 主要设备描述
方案二设备列表见表2。

表2 方案二设备

序号	名称	描述
1	电力变压器	10 kV/690 V
2	低压配电柜	690 V，1主回路+4分支回路
3	整流柜	AFE整流，配直流隔离开关
4	逆变柜	冗余配置,IGBT逆变器
5	DC/DC高频电源	配置斩波模块及直流开关
6	超级电容柜	电容柜，充放电柜
7	裂解炉风机电机	

电力变压器：采用油浸免维护电力变压器。

整流器：本方案采用新型IGBT整流技术-AFE整流器，是三相全控可控整流，可以将交流电源整定为设定的直流电源；此外，利用IGBT三相桥式整流特性，可以有效降低谐波对电网的影响，实现电网与直流母线间电能的双向流动；同时，可获得比二极管、晶闸管更高的整流效率与更优异的整流效果，采用冗余配置。

逆变器：逆变器采用IGBT器件，将直流电转换为频率、幅值、相位和电流可控的交流电源，为电动机供电，采用冗余配置。

DC/DC模块：DC/DC模块是将持续变化的直流电源，斩波整定为电压恒定的直流电源；通过DC/DC模块，可以有效减少超级电容的容量，采用冗余配置。

超级电容：超级电容是一种介于传统电容和电池之间的能量载体，具有充电时间快、瞬间放电电流大、能量密度高和循环寿命长的特点，非常适合瞬间大功率放电应用的现场。

3) 方案分析

在本方案中，普通变压器与低压配电柜及AFE(IGBT)整流柜串联构成了电源进线。与晶闸管整流方案一样，方案二中两套电源进线及单母线共同组成双电源进线单母线结构，满足了工艺用电负荷对电源的要求。

与晶闸管整流方案一样，由于母线段采用直流，依据直流特性，母线段较交流的双电源进线单线分断结构可以省略分断用断路器及复杂的ATS或快切等一二次设备，也可以根据工程需要保留母联开关，仅作为开合使用。

此外，因为汇接于直流母线上的两路并列电源

是直流电，且整流器采用的是全控可控整流，与晶闸管整流方案相比可以更灵活调节输出电压，抑制谐波，可调控均流。

在工作状态下，两路并列电源同时运行，与晶闸管整流方案相比较，在控制器调节作用下可以更灵活、快速调节各整流模块的输出直流电，即相比晶闸管整流方案可以更好协调两套整流器的运行，减少两路进线间电压的不平衡，减少电流因电压不同在两路电源间产生的环流，但需要设置主从逻辑。

与晶闸管整流方案一致，在一路电源故障切除时，可以实现无扰动零秒切换。具有比普通交流系统更快的切换速度。连接在母线段上的超级电容，则可以在发生晃电事故时，确保直流段上母线电压的平稳。也可以在日常的运行中为直流母线削峰填谷，使系统获得更平稳的直流电源。

双逆变器变频为裂解炉风机电机提供电源，使在负荷侧解决了电源冗余问题，提高了电源的可靠性。

3. 两种方案的对比

方案一与方案二主要区别在整流段，技术及投资上各有优劣，对比见表3。

表3 方案对比

对比内容	方案一 可控硅整流方案	方案二 AFE (IGBT) 整流方案
变压器	24脉整流变压器	普通变压器
功率器件	晶闸管晶闸管	IGBT
保护	软、硬件	软、硬件
故障报警	有	有
主从控制	无	需要
均流	回路阻抗均流	软件均流
环流	无	环流抑制
在线检维护	允许	允许
在线投切	允许，无需控制	允许，需要软件控制
自动化程度	较低	较高
成本	较低	较高
谐波分量	<5%	<5%
故障率	低	高
故障风险点	逆变器	整流器、逆变器

通过表3分析对比可以得出：

1) 从技术需要方面出发，两种方案都可满足技术要求，实现直流双电源供电。

2) 从可靠性角度分析，鉴于晶闸管技术成熟度比IGBT要高，且控制的复杂程度晶闸管整流要低

于AFE (IGBT) 整流。因此晶闸管整流方案相较于AFE (IGBT) 整流方案可靠性更高。

3) 从成本角度比较, 由于技术的成熟度与复杂程度晶闸管的成本要低于AFE (IGBT)。所以晶闸管整流方案的投资成本要低于AFE (IGBT) 整流方案。

4) 从整流效率与效果分析, AFE (IGBT) 整流的效率与效果要优于晶闸管整流。

5) 关于谐波抑制, 两种方案都可实现低于5%谐波分量。

总之, 两种方案都可以满足技术要求, 各自都有独特的优缺点。需要视具体工程项目施工要求进行选择。

4. 共直流母线变频系统与传统变频的比较

共直流母线变频系统相比与传统变频, 具有以下优点。

(1) 从电源方面比较

传统单传变频依托于装置的电力系统, 一般采用交流双电源进线单母分断结构。电源发生故障时, ATS/快切动作, 实现进线电源的切换。

共直流母线变频系统则采用了双电源共直流母线型式。正常工作时, 系统将交流电源整流成直流电, 电源来自两段电源中电压相对高的一段。当该段电源发生故障或发生晃电等现象时, 系统自动由另一段电源进行供电, 保证系统和生产的正常运行。切换无延时。

可以看出, 共直流母线变频系统相比于交流双电源进线单母分断结构更有优势。

(2) 交流母线与直流母线的比较

相比较交流母线供电, 直流母线系统具有用电效率高、可挂载储能设备平稳母线电压, 还可在晃电发生时维持母线电压。此外, 直流还具有功率因数较高、电网谐波较低的特点, 能够有效减少谐波、无功补偿等问题。

(3) 系统的扩展性

共直流母线变频系统利用直流母线的优势, 可以和其他直流设备进行组合配置, 在变频器的基础上, 可以自由扩展储能、新能源装置和抗晃电装置等设备, 后续还可以结合交直流混合配电网技术, 形成完整的交直流输配电系统。

(4) 抗风险能力

单传变频器中整流、逆变元件串联, 整体抗风

险能力低。

共直流母线变频系统中采用系统化设计, 将整流段融入电力系统, 从而实现利用系统化抵抗风险。同时, 逆变段采用双机冗余配置, 即降低了投资同时也增强了驱动端抗风险能力。即经过系统化设计后的共直流母线变频系统抗事故风险能力原超个体装置-单传变频器。

(5) 工程造价比较

共直流母线变频系统与传统单传+双电源进线单母分断系统相比较前期工程费用略高, 但在新增变频负荷时费用要远低于单传变频器。

结束语

共直流母线变频系统在技术上是可行的, 相比于单传变频具有很大的抗风险能力, 在多负荷同时运行时, 采用共直流母线变频系统方案更有优势, 且更适用于乙烯裂解炉风机电机变频驱动。直流母线型式比交流母线拥有更强的柔性可扩展型。共直流母线变频系统更利于数字化、智能化发展。

总之, 进一步研究和探索裂解炉风机电机变频具有现实意义。通过不断探索和实践, 可以进一步提高乙烯裂解炉风机电机变频运行的安全性和可靠性, 为石化行业的高质量发展做出贡献。EA

(收稿日期: 2024-07-11)

参考文献

- [1] 供配电系统设计规范: GB 50052—2009 [S].
- [2] 石油化工企业供电系统设计规范: SH/T 3060-2013[S].
- [3] 中国航空规划设计研究院有限公司. 工业与民用供配电设计手册[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [4] 杨飞, 贾华. ABB ACS800低压多传变频器在包钢钢管公司460生产线的应用[J]. 科技风, 2018(22): 1671.
- [5] 张磊. ACS800多传系统及其在工业上的应用[J]. 科技创新与应用, 2015(24): 154.
- [6] 杨巍, 李世勇. “一拖多”共直流母线调控技术与应用[J]. 石油石化节能, 2023(3): 34-38.