

# 有源滤波器在海上平台电网的应用

鲁醒悟

(中海石油(中国)有限公司天津分公司)

**摘要：**随着海洋石油行业的不断进步和海洋能源的快速发展，海上平台电网的稳定性和电能质量成为一个重要的问题。尤其现在海洋平台由传统的自发电孤岛电站模式转为陆地“岸电”供电模式后，电网的稳定性对油田稳产有着极大的意义。传统的无源滤波器在海上平台电网中的应用存在局限性，因此有源滤波器的应用逐渐成为改善电网质量的有效解决方案。本文将重点探讨有源滤波器在海上平台电网中的应用，并分析其优势和挑战。

**关键词：**海上平台；电能质量；滤波器；电网

## 1 背景

海上平台电网是海洋能源开发的重要组成部分，由于海洋石油开采行业具有环境的复杂性和油井变频驱动带来的谐波干扰等不稳定性，因此海上平台电网面临着电能质量和稳定性的挑战。传统的无源滤波器在电网中的应用存在一定的制约局限性，现如今有源滤波器在电网中的应用逐渐成为改善电网质量，提升电网可靠性，净化电网杂波的有效解决举措<sup>[1]</sup>。

## 2 电网谐波现状

变频器在海洋油气田开发中的应用主要集中在修井驱动、油井变频驱动、大型注水电机变频器驱动等。但在享受变频、软起动等先进调频调压装置带来便利的同时，电网污染也不容忽视。油田电网的谐波畸变率明显增加，尤其以3次谐波、5次谐波及7次谐波为主，甚至发现有的平台电网3/5次谐波占比达到20%左右。为进一步解决油田电网高次谐波这一

难题，滤波器的使用显得尤为重要。

## 3 滤波器介绍

### 3.1 无源滤波器

#### 3.1.1 无源滤波器原理介绍

无源滤波器也称作LC滤波器，它是由电感、电容和电阻组成的滤波电路，可以滤除某一次或多次谐波分量。最常见且易于采用的无源滤波器结构是将电感与电容串联，以形成低阻抗旁路来对主要次谐波分量（3次、5次、7次）进行滤除。无源滤波器的行为模式是通过提供被动式谐波电流旁路通道来达到滤波的目的。目前，有单调谐滤波器、双调谐滤波器和高通滤波器等其他类型的无源滤波器。

#### 3.1.2 无源滤波器的特点及应用

无源滤波器受所在系统阻抗变化的影响较大，容易出现谐波放大和产生共振的风险，而有源滤波器则不受这些因素影响。此外，无源滤波器的谐振点可能

会发生偏移，从而会降低滤波效果，而有源滤波器则不会受到这种因素影响。此外，当谐波量超过补偿能力时，无源滤波器可能会损坏，而有源滤波器则没有这个风险，只会导致补偿效果不足。由于价格优势和不受硬件限制，无源滤波器现在广泛应用于电力、能源、石油化工等各个行业。

### 3.2 有源滤波器

有源滤波器（Active Power Filter, APF）是一种新型的电力电子装置，用于动态抑制谐波和补偿无功。它能够对大小和频率都存在变化的谐波和无功进行补偿。相比而言，有源滤波器由电力电子元件和 DSP 等构成的电能变换设备组成。它能检测负载所包含的谐波电流，并主动提供相应的补偿电流，从而使源电流几乎接近于纯正弦波。有源滤波器的工作模式是通过自主式的电流源输出来达到滤波作用<sup>[2]</sup>。

有源滤波器有两种类型，分别是并联型和串联型。并联有源滤波器主要用于应对电流谐波，而串联有源滤波器主要用于应对电压谐波等相关问题。与无源滤波器相比，有源滤波器具有更好的治理效果，能够同时滤除多次和高次谐波，而且不会引起谐振。

#### 3.2.1 有源滤波器的特点及应用

有源滤波器可以根据其滤波特性分为低通、高通、带通和带阻滤波器。同时，它能够滤除 2~50 次谐波，可以对 2~50 次内任意次数谐波进行补偿，而且响应时间小于 300 $\mu$ s。有源滤波器能够自动消除谐振，不受电网和系统阻抗变化因素影响，同时能够补偿谐波、无功和负载三相电流不平衡三种工作方式。它适应各种不同工况的电能质量环境。如果系统电压波动超限，机器会自动闭锁，停止输出，并及时报警。

近年来，有源滤波器在各类配电网中被广泛应用。在我国的海洋石油行业中，由于大量的潜油电泵都配有单井变频器，这导致海上采油平台配电系统中谐波含量大大增加。目前绝大部分单井变频器整流器

都是应用 6 脉冲将交流转化为直流，因此产生的谐波以 5 次、7 次、11 次为主，这些高次谐波对系统中其他电力设备的稳定运行造成危害，同时对系统中电能计量方面带来偏差，产生较多不良影响。因此，有源滤波器因其自身具有的优越特性，能够很好地应对这些问题。

#### 3.2.2 有源滤波器工作原理

有源电力滤波器是一种采用现代电力电子技术和基于高速 DSP 器件的数字信号处理技术制成的专用设备，目前广泛用于治理电力谐波。有源电力滤波器主电路如图 1 所示。其内部一般主要由指令电流运算电路和补偿电流发生电路组成。指令电流运算电路能够实现对线路电流的实时监测，同时将模拟电流信号转变为数字信号，然后经过高速数字信号处理器处理。实现将谐波与基波进行分离，最后用脉宽调制（PWM）信号的方式向补偿电流发生电路发送驱动脉冲。这些驱动脉冲将 IGBT 或 IPM 功率模块驱动起来，生成与电网谐波电流幅值相等、极性相反的补偿电流注入所在的电力系统中，达到对谐波电流补偿或抵消的目的，实现主动消除电网谐波<sup>[3-6]</sup>。

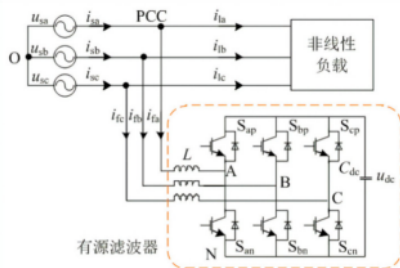


图 1 电压型有源滤波器

## 4 有源滤波器的应用

### 4.1 有源滤波器应用背景介绍

在海洋油气田开发中变频器的应用尤为广泛，集中在修井驱动，油井变频驱动，大型注水电机变频器

驱动等。在享受变频、软起动等先进调频调压装置带来便利的同时，电网污染也应运而生。油田电网的谐波畸变率明显增加，尤其以3次谐波，5次谐波及7次谐波为主，在电网质量检测中甚至发现有的平台电网3次、5次、7次谐波占比达到20%左右。

#### 4.2 有源滤波器应用依据

APF和无源滤波虽然都是对系统进行谐波滤波，但滤波原理上是不一样的，无源滤波是利用电容与电感的谐振频率将系统谐波源分流。APF是将系统谐波抵消，理论上讲，电容滤波不可能将谐波全部滤除（因为那样所有谐波电流、电压都将从电容柜走，电容柜是吃不消的）。它会根据系统的谐波分量发出一个大小相等、方向相反的谐波分量，从而实现对原谐波分量的抵消。因此，APF可以将系统谐波全部抵消掉，滤波效果更好。

在海上平台电网中，单纯依靠无源滤波器滤除杂波还远远不够。首先无源滤波器的滤波特性受到电网参数的影响，难以适应电网参数的变化。其次无源滤波器的响应速度较慢，无法满足对电能质量的实时要求。最后无源滤波器的可调节性较差，难以应对电网故障和变化的电能需求。因此在油田电网治理中单独依靠无源滤波器并不能实现，鉴于此现实问题，油田展开多方面技术沟通，创新性地提出了采用有源滤波器与现有无源滤波器等相结合的电网净化并行模式。

#### 4.3 有源滤波器创新性使用

平台配电系统的稳定性对生产工艺流程有着重要影响，电网系统中存在的大量非线性负载，给整个配电系统带来了严重的谐波污染。为实现提高电网质量且同时推进节能降耗的双向目标，我们创新性地提出了有源滤波器与无源滤波器相结合的设计，既能发挥有源滤波器全方位多频段的滤波功能，提升无源滤波器的处理范围，又可以消除无源滤波器的谐

振难题。对此在配电室安装2套400V/750A有源电力滤波器进行谐波治理。每套750A有源滤波器分为两段接入配电柜开关中，采用两套4000:5电流互感器，分别安装于变压器出线柜及有源滤波柜进线处，做并联采集电流信号使用。

APF装置采用了最先进的数字控制技术和行业领先的三电平拓扑技术，针对电网中谐波成分和无功成分可以进行精确动态补偿，是治理谐波和无功的良好方案。该APF装置满足海洋环境所处的温湿度要求，同时对低压400V电网等级完美适配，且控制方式多样化，通讯接口可以将运行参数及状态实现智能化远传，便于后期设备集中智能化系统的传输及操控。

#### 4.4 有源滤波器安装调试部分

有源滤波器装置采用模块化的安装布局，这种布局能够更好地利用空间，拆装方式简单，为后期维护检修提供更大的便利。如某一单元模块出现故障时，对此故障单元拆除后修改投入组数及编码调整后即可恢复投入无故障组块。APF采用并联形式接入母线电网，电网侧及有源滤波器进线侧安装互感器进行数据的运算及测量。

模块安装时需要着重关注的是APF模块的散热问题，由于滤波器运行过程中散热量较大，因此模块前后需要有足够的进出风空间，建议在模块前方至少预留50mm，模块后方至少预留400mm的空间。APF模块的安装接线根据说明书及单元后背板处对应的接线端子位置接入即可。该模块接线部分包括主电源进线接线，并机通讯接口，模块对应监视屏接口，DSP拨码开关，CT接线等。

海洋油田电网多采用三相三线制，该APF系统根据海上IT电制，采用三相三线式接线方式，如图3所示。CT测量电流采用CT测负载端的接法，需要注意的是在安装CT时一定要将负载彻底断电，确保穿过CT的电缆或铜排中没有电流。在安装好CT后，

将 CT 接线端子连接到模块上，避免 CT 副边开路，造成人员及设备的损坏。

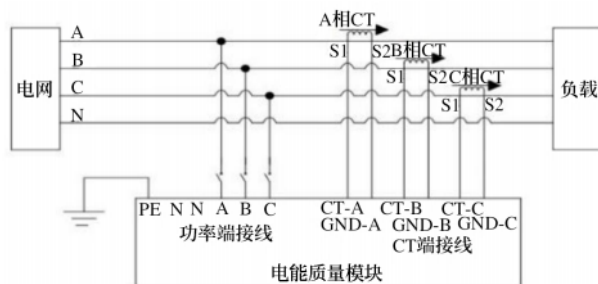


图 2 接线图

有源滤波器系统采用了更加直观，操控性能更加优异的人机界面，该人机界面将系统所采集的各参数数据、滤波器组的状态、设备运行状态、操作模式等集中呈现，在人员操控，检查，故障判断时可以实现对设备状态的全面把控。

## 5 有源滤波器应用效果

### 5.1 APF 应用前数据介绍

APF 设备开启前，系统电流约 2195~2236A，电流畸变率在 25% 左右，电压畸变率达到 9.4%~11.2%，电流波形大大偏离理想正弦波，其中 5 次、7 次谐波含量最高，对系统造成威胁。

### 5.2 APF 应用后数据介绍

APF 设备开启后，系统电流约为 2158~2196A，电流畸变率在 5.5%~7.2%，电压畸变率达到 4.2%~6.1%，电网的功率因数由之前的 0.93 提高至 0.95，电流波形趋近理想正弦波。其中 5 次 / 7 次谐波含量由未投入前的 21%/13% 降低至 4%/1%，电网电流畸变率由之前的 25.1% 降低至 5.6%，电网电压畸变率由之前的 9.8% 降低至 4.4%。以上可以很直观地看到有源滤波器投入运行对电网谐波治理起到了良好的效果，既改善了系统电能质量又提高了电网的功率因数。改善后的电网畸变率对比如下表所示。

表 畸变率对比

类型	电流大小	电流畸变率	电压畸变率	5 次谐波	7 次谐波	
畸变率 (%)	投入前	2195	25.1%	9.8%	21%	13%
	投入后	2158	5.6%	4.4%	4%	1%

## 6 结束语

有源滤波器具有可调节性，可以根据电网的需求实时调整滤波特性。它具有响应速度快的优势，可以满足对电能质量的实时要求。通过以上有源滤波器投入前后的鲜明对比，可以很直观地看到有源滤波器在对电网谐波治理、电网功率因数提升等方面显著作用。

鉴于以上有源滤波器在油田电网中应用所产生的良好效果，在油田应用变频器等易产生高次谐波及杂波的电网环境中并联有源滤波器与油井系统无源滤波器相结合的模式无疑是一次成功的创新性应用。这也为后期处理电网系统高次谐波提供了一个全新的思路 and 方向。

## 参考文献

- [1] 杨爱琴, 李晓萍. 滤波器的发展与展望 [J]. 电子科技, 1995 (2).
- [2] 蒋明. 数字滤波器的设计和算法的实现 [J]. 微电子学与计算机, 2000 (2): 61-64.
- [3] 张洪涛, 万红, 杨述斌. 数字信号处理 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [4] 程佩青, 数字信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [5] 郭永基. 电力系统可靠性分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [6] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构 [J]. 电网技术, 2006 (24): 73-77.

(收稿日期: 2023-11-09)