

## Application Note

## 用于控制和保护的 HVDC 架构和设计方案简介



## 摘要

本应用报告介绍了用于控制和保护的高压直流 ( HVDC ) 输电架构和解决方案。

## 内容

1 HVDC 输电概述和架构.....	2
2 HVDC 输电系统 ( HVDC 站 ) .....	5
3 HVDC 输电站 - 控制和保护 ( C 和 P ) .....	9
4 HVDC 输电控制和保护 - 系统级框图.....	12
5 TI 的 HVDC 输电站控制和保护解决方案.....	13
6 总结.....	16
7 TI 参考设计.....	17
8 其他参考内容.....	18
9 Revision History.....	19

## 插图清单

图 1-1. HVDC 输电站.....	3
图 1-2. HVAC 和 HVDC 输电的成本比较.....	4
图 2-1. HVDC 输电站概述.....	5
图 2-2. HVDC 站主要组件.....	5
图 3-1. HVDC 输电站 - 控制和保护.....	9
图 4-1. HVDC 控制和保护系统框图.....	12
图 5-1. HVDC 输电控制和保护 - TI 解决方案.....	13

## 表格清单

表 1-1. 比较 HVDC 和 HVAC.....	2
表 2-1. HVDC 转换器开关元件汇总.....	7
表 4-1. HVDC 站模块描述.....	12

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 HVDC 输电概述和架构

本文档概述了高压直流 (HVDC) 输电以及 HVDC 相对于高压交流 (HVAC) 的优势。本应用报告重点介绍了 HVDC 站的控制和保护要求, 以及控制和保护系统设计中可以采用的产品和解决方案。

### 1.1 发电和输配电

大型发电厂发电, 然后电力通过输电线路进行高压 (110kV 或以上) 长距离 (> 100km) 输送, 然后被降压到配电网电压水平 (11kV 或 415V), 将电力提供给消费者。大多数发电厂都采用交流发电方式, 并且后续整个系统都采用交流电, 因为可以轻松使用变压器来实现升压或降压。发电厂发出的大量电力通过高压输电线路输送至消费者。在短距离输电 (< 100km) 时, 广泛采用交流输电。当输电距离更长 (> 500km) 时, 采用交流输电存在一些限制。

### 1.2 HVAC 至 HVDC 输电

全球供电需求一直在不断增长。发电厂通常位于能源附近, 从而尽可能降低成本和环境影响。这些发电厂通常都远离人口密集区域或城市, 因此以经济高效的方式输送生产的电力非常重要。这一点是通过高压输电来实现的。采用高压 (HVAC) 输电主要是因为通过变压器 (在发电厂升压并在变电站降压) 可以轻松实现升高电压。

为满足不断增长的需求, 公用事业一直在设法通过电网互连均衡负载来提高系统性能, 以及寻找新型技术 (HVDC 或柔性交流输电系统 [FACTS]) 来提高效率。HVAC 的优势是电压转换更简单、电流中断更容易。在某些情况下, 当涉及到长距离输送线路 (> 500km) 时, 由于电压不稳和传输损耗更高, 因此无法使用 HVAC 输电技术。HVAC 的劣势是长距离输电、载流容量、无功功率 (需要沿传输线路在不同的位置提供无功功率补偿) 损耗、趋肤效应 (载流导体上的不均匀电流分配, 其中大多数电流都位于有效电阻更高的导体外层) 和费兰梯 (接收的电压高于输送的电压) 效应方面的限制。解决方案便是采用 HVDC 进行长距离输电。

#### 1.2.1 比较 HVDC 和 HVAC

在决定是否设立新的 HVDC 站时, 有多个重要参数会影响最终决策。表 1-1 从这些重要参数方面对直流方案和交流方案进行了比较。

表 1-1. 比较 HVDC 和 HVAC

参数	HVDC	HVAC
输电类型	直流	交流
应用	高压输电	高压/中压输电
输电功率和距离	不受距离影响, 无限制	受距离影响, 需要中间变电站
损耗	较低	较高
输电成本 (导线和电杆)	成本较低: 输电只需两根导线, 并且直流电缆费用低于交流电缆。	输电成本较高
设备费用	较高	较低
电站设计复杂性	较高	较低

HVDC 输电的一些主要优劣势包括:

- 优势
  - 大规模输电成本更低, 并且每个电路每根导线可以输送更多电力
  - 无趋肤效应和电压稳定性问题
  - 支持异步互连
  - 短路故障水平较低, 故障清除时间短
- HVDC 的劣势
  - 转换器费用昂贵
  - 会生成谐波并存在无功功率要求
  - 难以实现断路

#### 1.2.2 HVDC 输电的主要目标

HVDC 输电可用于提升输电效率并增强异步电网的互连性能。采用 HVDC 输电的主要目标总结如下:

- 大规模输电：两点之间长距离大规模输电（架空线路时距离 > 500km）。
- 连接异步系统：实现在采用不同频率运行的电网系统之间传输电力，提高了每个电网的稳定性和经济性。
- 海上风电场集成：简化从海上风电场到大型负载消耗中心的大规模输电。
- 背对背 HVDC 系统：整流和逆变都在具有极小直流线路的同一换流站内进行

### 1.3 HVDC 输电站的工作原理

在 HVDC 站中，换流变压器将产生的交流电压升高到所需的电平。换流站接收来自三相交流电网的电力并将其整流为直流，然后通过架空线路（或电缆）进行输送。在换流站的接收端，逆变器将直流电压转换回交流，然后在各个客户端将电压降至配电电压电平。图 1-1 展示了输电过程。这项技术适用于输送额定功率范围介于 100-10,000MW 之间的电力。

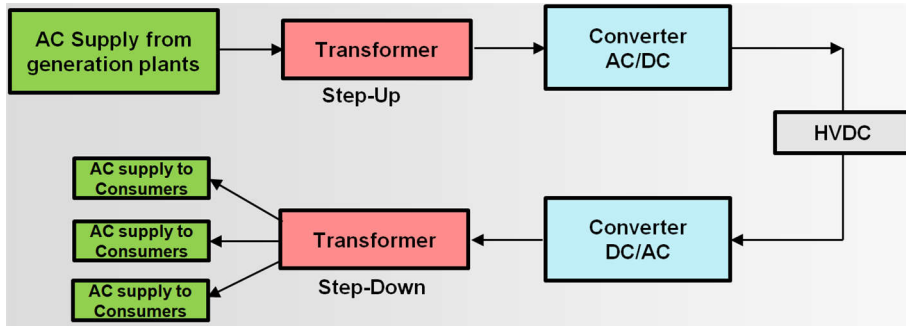


图 1-1. HVDC 输电站

### 1.4 HVDC 输电的优点

使用 HVDC 不仅能降低成本，而且还能减少损耗 ( 5%-6%，使用 HVAC 技术时则为 8%-10% )。相对于 HVAC 的其他优点包括稳定性、可控制性等等。当距离超过平衡点距离时，HVDC 系统会变得更具有成本效益，如图 1-2 中所示。

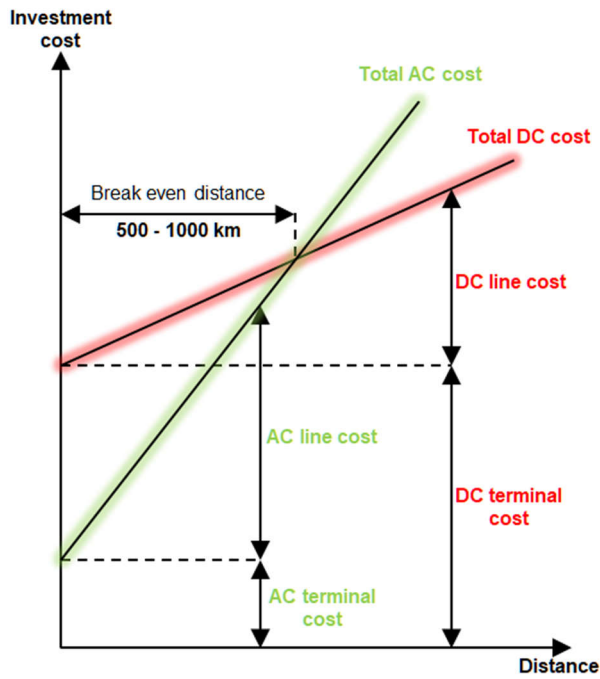


图 1-2. HVAC 和 HVDC 输电的成本比较

## 2 HVDC 输电系统 (HVDC 站)

HVDC 系统采用直流进行长距离输电。HVDC 输电系统可以分为以下功能模块，如图 2-1 中所示。

- 用于升高交流电压的换流变压器
- 用于交流至直流转换的换流站 (整流器)
- 直流输电线路
- 用于将直流 (架空或地下) 转换回交流的换流站 (逆变器)
- 用于降低交流电压的换流变压器

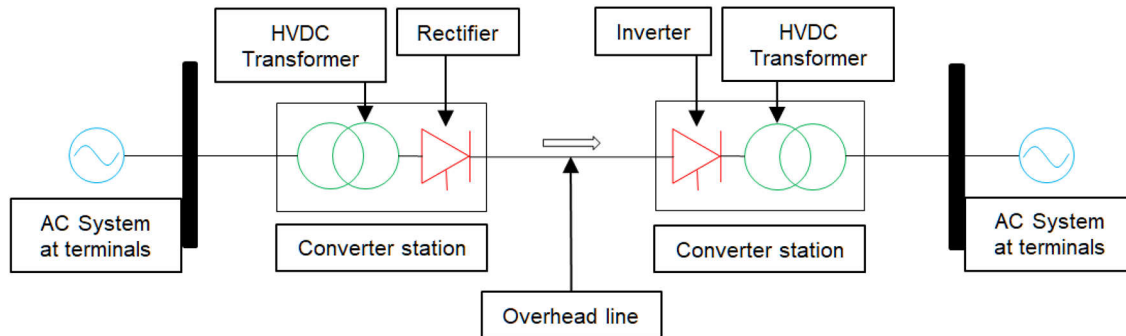


图 2-1. HVDC 输电站概述

### 2.1 HVDC 输电技术

要采用直流，就需要转换步骤。要将高压交流电转换为直流电，有两项技术可供使用，分别是传统的线路整流转换器 (LCC) 和电压源转换器 (VSC)。LCC 常称为 HVDC Classic，而 VSC 具有多个名称，例如 HVDC Light (ABB)、HVDC Plus (Siemens)、HVDC MaxSine (Alstom) 和柔性 HVDC (中国)。

LCC 转换器技术基于名为晶闸管的半导体开关。晶闸管需要导通或触发才能传导电流。这类开关可以承受任何极性的交流电压，但电流只能沿一个方向流动，并可通过调节晶闸管的导通时间来加以限制。该晶闸管导通的时间 (即正弦波中的角度) 称为触发角或阀触发延迟角，用于控制 HVDC 站之间的电流流动。

电压源转换器技术基于绝缘栅双极晶体管 (IGBT)。IGBT 可以通过导通或关闭来进行控制。在 VSC 技术中，直流电可以双向流动。这是相较于 LCC 技术的一项优势。在 LCC 技术中，电流只能沿一个方向流动。考虑到 VSC 中直流电流的双向流动能力，因此无需更改转换器的直流电压极性来改变转换器之间的电流方向。与 LCC 技术相比，使用 VSC 技术时可以连接到具有低短路电平的弱电网。

在基于 VSC 的 HVDC 中，功率可以通过更改转换器交流电压相对于滤波器总线电压的相位角度来加以控制，而无功功率可以通过更改转换器交流电压的基波分量相对于滤波器总线电压的幅度来加以控制。通过控制转换器电压的这两个方面，可以在全部四个象限内运行。

### 2.2 HVDC 输电系统 (HVDC 站) 主要组件

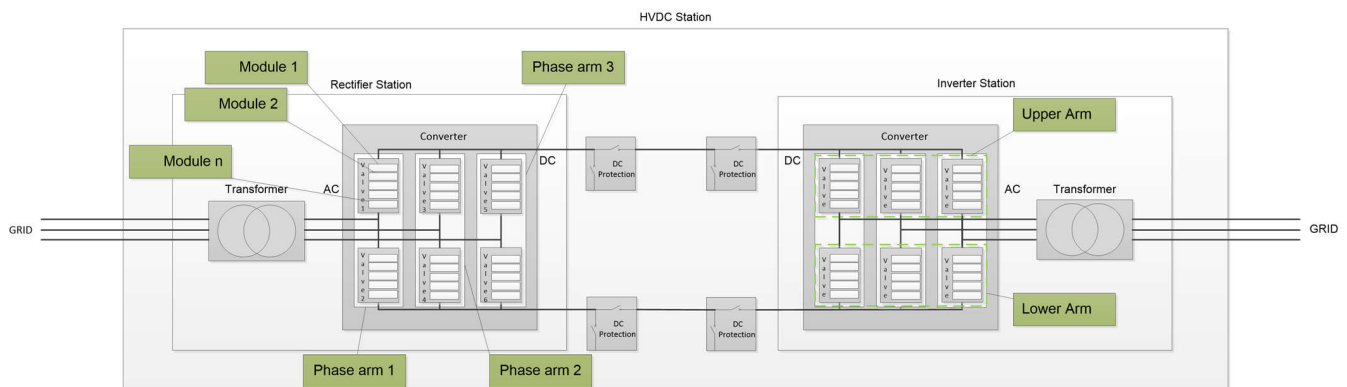


图 2-2. HVDC 站主要组件

考虑到使用的转换技术、额定直流电压和额定功率，HVDC 输电系统的主要组件包括：

- 转换器
- 换流变压器，包括 TAP 控制器
- 输电线路、架空线路或地下电缆
- 谐波减少和波形整形设备
- 保护设备

### 2.2.1 转换器

转换器是 HVDC 系统的核心，负责执行交流/直流和直流/交流转换。每个 HVDC 系统的每一端都有两个转换器。发送端的转换器用作整流器，而接收端的转换器用作逆变器。根据 HVDC 技术，转换器可以基于 IGBT 或晶闸管开关元件。

转换器通常由一个或多个 IGBT/晶闸管桥组成，其中每个桥均由六个 IGBT/晶闸管阀桥臂构成，即根据系统的电压和额定功率，包含多个单独的 IGBT/晶闸管。要实现更高的电压和电流，开关器件 (IGBT 或晶闸管) 可并联或串联。要实现更高的电压，开关器件会串联，而要实现更高的电流，开关器件会并联。常用的 HVDC 配置包括单极和双极链路，而 HVDC 站中的转换器数量取决于配置。

### 2.2.2 转换器阀桥臂

阀采用模块化设计，并采用现代光触发晶闸管作为如今的 500kV 晶闸管阀。各个晶闸管模块将以阀塔形式排列。根据阀厅和变压器布置，双联阀塔或四联阀塔都是可能的解决方案。对于 UHVDC 应用，由于阀厅内的大间隙要求，因此双阀塔似乎更合适。

阀桥臂包含数个串联 (或并联) 的开关元件。根据转换器拓扑是 LCC 还是 VSC，开关元件可以是晶闸管或 IGBT。开关元件的数量取决于 HVDC 站的电压电平。

- 晶闸管 LCC 阀：根据应用和制造商不同，晶闸管阀可能采用不同的构建方式。不过，晶闸管阀的最常见排列方式是具有三个四联阀的十二脉冲组。每个晶闸管阀均由一定数量的串联晶闸管及其辅助电路构成。控制装置与每个具有高电势的晶闸管之间的所有通信均通过光纤进行。
- IGBT VSC 阀：VSC 转换器由一个两级转换器或多级转换器、相位反应器和交流滤波器组成。转换器桥中的每个阀都由一定数量的串联 IGBT 及其辅助电子元件构建而成。VSC 阀、控制装置和冷却装置都带有外壳 (例如标准装运容器)，这使得运输和安装变得非常轻松。所有现代 HVDC 阀都采用水冷和空气绝缘。

#### 2.2.2.1 转换器相桥臂

转换器的相桥臂由两个阀桥臂 (上桥臂和下桥臂) 组成，它们连接到交流电源换流变压器的输入或输出端。每个相位都有两个桥臂。交流会以三相配置沿着电网输送。一个三相转换器包含三个相桥臂，这些相桥臂由 6 个阀组成。表 2-1 展示了 200kV HVDC 转换器所需的开关元件数量。

表 2-1. HVDC 转换器开关元件汇总

转换器类型	开关元件	额定电压 kV	HVDC 额定电压 kV	阀门桥臂数	每个阀的开关元件近似数量	每个转换器的开关元件近似数量
LCC	晶闸管	6.5	200	12	35	420
VSC	VSC	1.5	200	6	135	810

表 2-1 展示了一些指示性计算值，用于帮助了解 HVDC 系统的复杂性、互连构成阀/转换器的器件数量，以及用于采用 200kV 电压电平的 200-250MW 输电系统的器件数量。根据额定电压，IGBT/晶闸管采用串联，而根据额定电流，IGBT/晶闸管采用并联。

### 2.2.3 换流变压器

换流变压器负责将交流母线的电压转换为转换器所需的输入电压。变压器是交流侧与直流侧之间的接口。因此，阀门侧绕组与接地之间的交流电压和直流电压电势都会对主绝缘造成压力。这些是特殊类型的变压器，为可承受高谐波电流和电压应力。此外，它们还具有分接开关，可优化 HVDC 操作。换流变压器用作交流系统和直流系统之间的电流屏障，以防止直流电势进入交流系统。HVDC 输电的适用情况取决于换流变压器性能。

HVDC 输电要求转换器和逆变器端具有大电压控制。换流变压器通常包含有载分接开关来协助进行电压调节。分接范围较大 (大约 25%-30%) 并具有小步长，能够对电源电压进行必要的调节。有载分接开关 (OLTC) 用于更改变压器绕组比，从而控制触发电角和补偿电压变化。当转换器用作整流器时，OLTC 用于控制直流输出电压，而当转换器用作逆变器时，OLTC 则用于控制进入电网的交流电压。可对变压器变比加以控制，以防止转换器发生过调制或欠调制。在过调制或欠调制区域内操作转换器可能会对谐波性能产生负面影响。

### 2.2.4 输电线路

输电线路可以是架空线路和地下 (海底) 电缆。架空线路更为常见，而且通常成本更低。

导线通过塔杆悬挂在空中，并且通常不做绝缘处理。架空电缆面临一些挑战，其中包括线路张力、下垂、过载导致的过热以及环境变化导致的负载容量变化。电缆始终会做绝缘处理，并通常用于地下应用。地下电缆用在难以使用架空线路的应用中，例如跨过水域，并且由于其能够抵御大风和冰暴，因此日益受到欢迎。

### 2.2.5 适用于纹波控制、谐波控制和波形整形的组件

为了确保 HVDC 站可靠运行，满足各项操作要求并提供所需的功率输出，除了整流和反转外，还需要电压调节、谐波控制、无功功率补偿和波形整形。连接的部分设备包括：

- 平波电抗器：它是连接到直流线路的线圈，可减少直流链路中的纹波和谐波、限制故障期间的电流，以及防止轻负载电流不连续，另外还有助于防止换向故障。
- 谐波滤波器：转换器会以电压和电流形式产生谐波。这些谐波可导致电容器及附近的发生器过热，并可干扰电信系统。谐波滤波器可用于缓解这些谐波。
- 无功电源：在稳态条件下，转换器消耗的无功功率约为所传输有功功率的 10-50%，并由并联电容器组提供。
- 接地电极：电极是指提供接地连接的导体。它们具有较大的表面，能够尽可能降低电流密度和表面电压梯度。

### 2.2.6 保护设备

为了在预防性维护活动和设备维护期间保证操作员的安全，提供了一系列保护设备，包括与 HVDC 线路串联的切断开关或隔离开关、接地开关以及交流/直流断路器。

### 3 HVDC 输电站 - 控制和保护 (C 和 P)

每个 HVDC 换流站都配备了控制和保护系统，能够在正常和异常条件下恰当运行。该控制系统可自我保护并能够高效稳定地运行，同时还能在不损害系统安全性的情况下提供出色的功率控制灵活性。HVDC C 和 P 还可以确保 HVDC 输电系统和交流网络之间不存在有可能对 HVDC 转换器或交流网络保护系统或者输电系统用户产生不利影响的有害相互作用。两个转换器（整流器和逆变器）的控制和保护系统设计为尽可能相同。

C 和 P 系统可对所有关键系统提供完全的冗余，并包括测量、处理、交换、指示和通信系统。转换器控制与滤波器、电容器和电抗器组的自动开关相结合，可实现所需的输电和交流总线电压幅度。高压器件的打开/关闭命令与控制系统联锁，从而防止断路器、隔离开关和接地开关的失步运行。另外还安装了防止已禁止系统或开关站配置的联锁装置。通过由站级控制功能控制的联锁装置，提供了防止人员访问阀厅和滤波器以及禁止区域的互锁功能。图 3-1 概述了 HVDC 站中使用的控制和保护功能。

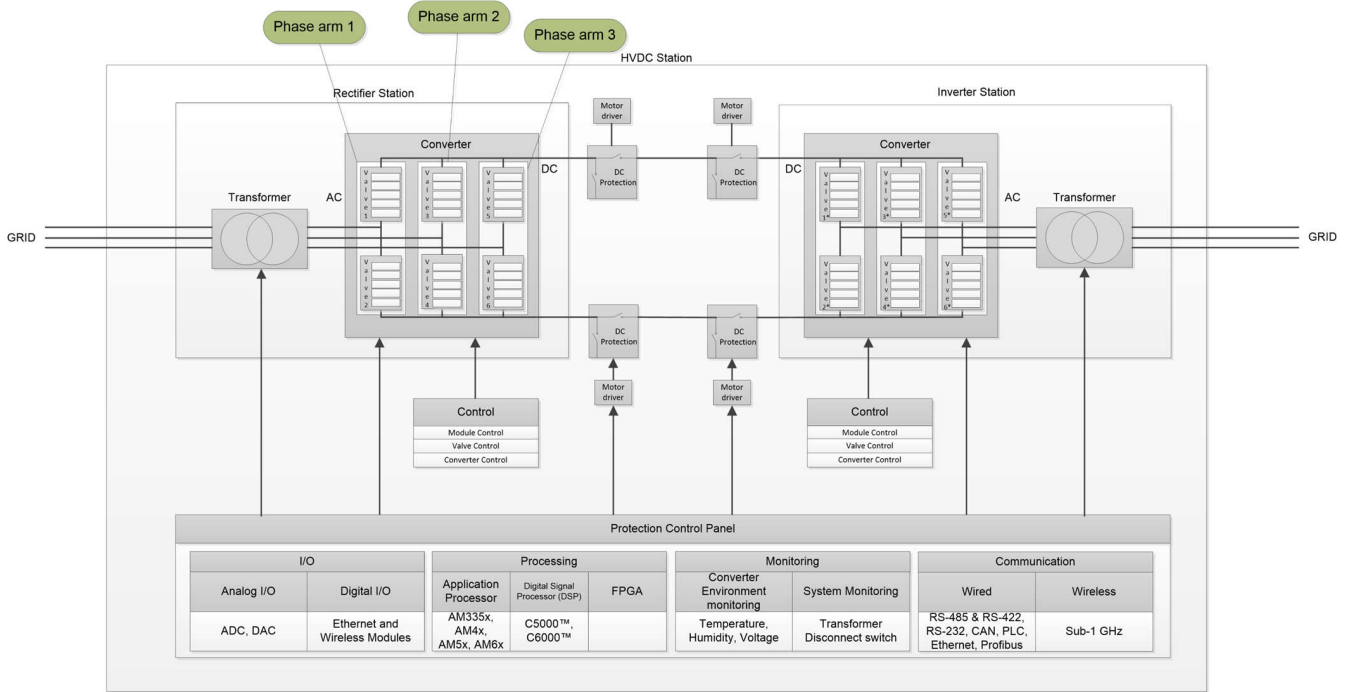


图 3-1. HVDC 输电站 - 控制和保护

#### 3.1 HVDC 输电站的控制

HVDC 链路的主要优势是可通过控制转换器快速控制输送的电力。现代转换器控制不仅速度快，而且非常可靠，因此用于提供线路和转换器故障保护。该控制系统采用层次结构形式，具体如节 3.1.1 中所述。

##### 3.1.1 系统控制

系统功能主要包括下列监控和数据采集 (SCADA) 功能：

- 控制、指示和警报
- 时间同步和互锁
- 使用隔离开关实现的顺序隔离
- 电压选择、共振和相位检测
- 仪表变压器监控
- 与特殊保护和运行跳闸方案接口
- 采用包括 IEC61850、IEC60870-5-101、IEC60870-5-104 在内的标准电网协议进行通信
- 计量功能，包括交流/直流电压/电流、有功/无功功率、谐波和其他参数
- 瞬态故障记录和电缆监测
- 转换器冷却和阀厅火灾检测
- 辅助电源和电源监控

### 3.1.2 主控制

一次只应有一个换流站具有针对 HVDC 输电系统的主动控制，该换流站称为主站。主站负责执行下列调度控制：

- 转换器控制模式，包括恒定有功功率、无功功率和电压控制
- HVDC 输电的启动和关断
- 频率控制
- 功率斜升和功率反转
- 紧急功率控制/功率需求覆盖
- 无功补偿和谐波滤波控制
- 切换机制
- 自动极性开关

### 3.1.3 换流站控制

换流站控制系统负责管理将 HVDC 系统集成到客户电力系统所需的设备，以及两极常见的那些功能。换流站控制系统的主要功能包括：

- 交流和直流开关站控制
- 有功和无功功率控制
- 交流电压控制
- 有载变压器分接开关控制
- 直流电流和电压控制
- 稳定性、运行状态和开关顺序控制
- 阀触发控制

### 3.1.4 极控或转换器控制

极控是 HVDC 控制系统的核心部分。它可以根据操作员的设定来控制直流电流。极控系统还能增强交流系统的稳态和动态性能。该系统还提供了一些其他功能，例如功率摆动稳定、频率限制控制以及次同步谐振抑制等。极控系统的主要功能是将传输的功率维持在操作员选定的值。这是通过在系统干扰期间维持最佳响应来实现的，并且在所有系统配置下都强大稳定。在正常不受干扰运行期间，直流电流控制在整流器中处于激活状态，而直流电压控制则在逆变器中处于激活状态。备用熄弧角控制提供了安全裕度，能够尽可能减少交流系统中出现干扰后逆变器处发生的整流故障。当整流站无法在交流系统干扰期间提供所需的直流电流时，逆变器电流控制功能便会激活。转换器控制会根据触发角指令或 PWM 占空比、分接开关控制及其他保护序列来协调电流转换指令。

### 3.1.5 阀基控制 VBC ( 阀控制 )

VBC 具有多项功能来控制循环电流和电容器电压，从而保护并监测换流阀。阀控制系统从极控 ( 转换器控制 ) 系统接收指令和信号来控制/监测阀内电力电子器件的导通。其主要功能是将转换器控制系统与 HVDC 电源转换器内的许多 ( 上百或更多 ) 电力电子器件连接。阀基电子器件 ( VBE ) 采用行业标准无源光学通信技术与大量的电力电子模块进行通信，能够以紧密同步且时间关键型的可靠方式控制和监测各个模块，同时在不损害冗余性的情况下尽可能减少所需的光纤数量。由 VBC 处理的一些功能包括基于从转换器控制收到的指令调制桥臂的参考电压、包括在上下桥臂之间和不同相位之间循环电流的电流均衡控制、通过计算工作子模 ( SM ) 正确数量来确保电容器电压位于合理范围内的电压均衡控制，以及阀和桥臂保护和监测。

## 3.2 HVDC 输电站保护

转换器保护功能可检测换流变压器次级侧上和阀厅中的故障，以及会导致阀过载的故障。换流站和保护系统采用妥善的设计，确保直流系统的正常、瞬态和动态行为不会影响转换器的交流保护及相邻的交流变电站。

HVDC 换流站的保护和控制系统旨在确保单个设备故障不会导致 HVDC 系统的整体故障。HVDC 设施可以分为数个单独受保护且重叠的区域。保护设备只应在指定的区域内发生特定类型的故障时发挥作用，并应在发生其他类型的干扰或相关区域之外发生故障时保持稳定。每个保护区域都由两个主要保护功能和一个备用保护功能尽量使用不同的保护原理来提供保护。当无法使用不同的保护原理时，则会使用重复的保护功能。保护功能会尽可能独立于控制功能。保护系统应当始终保持活动状态，并应当由独立电源供电。

保护系统由一个集成以下功能且完全冗余的保护方案组成：

### 3.2.1 HVDC 站的交流部分保护

HVDC 站的交流保护区域包括：

- 交流母线和线路区域保护
- 交流滤波器区域保护
- 换流变压器区域保护

### 3.2.2 HVDC 站的直流部分保护

HVDC 站的直流保护区域包括：

- 阀和辅助系统保护
- 直流转换器/极区保护
- HVDC 输电线路/母线区域保护
- 直流平滑滤波器、谐波滤波器和接地开关区域保护
- 断路器故障保护

### 3.2.3 设备保护和监测

HVDC 站中使用的其他设备包括：

- 油中溶解气体 (DGA) 和温度监测换流变压器
- 换流变压器 TAP 控制器
- 转换器冷却系统
- 电容器组
- 阀局部放电
- 辅助电源备用电池

针对冗余系统实施了切换逻辑，以确保 HVDC 站运行期间可以实现无缝转换而不会损失保护功能。

HVDC 换流站的保护功能包括用于交流母线、谐波滤波器、换流变压器、电极/转换器以及直流中性和直流滤波器的保护解决方案。保护功能可以检测和清除 HVAC 以及 HVDC 系统上的故障设备。保护功能采用模拟输入，包括来自现场级的电流和电压。跳闸命令会发送到相应的断路器，然后 HMI 事件顺序记录器中会生成警报。

### 3.2.4 采样和直流故障检测

根据 IEC61869-9 标准，HVDC 应用所需的采样频率为 96,000Hz。通常，故障检测设计为 2 $\mu$ s，对应的采样频率为 500,000Hz。此外，可以使用高速比较器来进行快速故障检测。

## 3.3 故障记录和监测

针对换流站内的交流系统和直流系统提供了故障记录器。瞬态故障记录器 (TFR) 集成在 HVDC 站的控制和保护部分中。TFR 会持续监测电力系统，在出现超出范围的情况时提供警报，并记录相关事件，以供进行离线分析。

## 3.4 控制和保护面板

所有控制和保护设备都装在一个中央控制面板中，面板与 HVDC 系统之间采用光纤接口进行通信。所需的冗余和转换逻辑均在控制和保护面板内实现。

## 3.5 诊断和监控

通过监测 HVDC 站内所连转换器和其他装置的局部放电，进行预测性诊断。通过采用基于光纤的分布式温度检测 DTS 来测量导线温度监测，以实现动态线路评价和诊断。为了防冰和动态负载管理，提供了 HVDC 站环境监测。

## 4 HVDC 输电控制和保护 - 系统级框图

图 4-1 展示了 HVDC 站的控制和保护框图。大多数设备都置于控制面板中，其中一些则靠近所保护的设备放置。

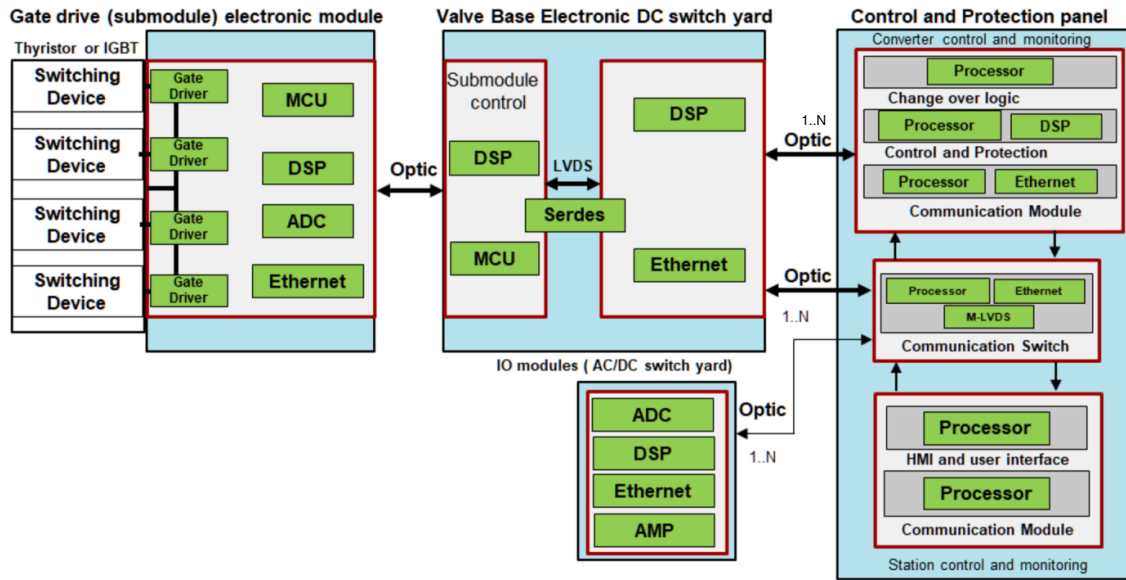


图 4-1. HVDC 控制和保护系统框图

在 HVDC 站和控制面板中，以下模块会相互连接以提供所需的保护和控制功能

表 4-1. HVDC 站模块描述

模块	应用	位置
栅极驱动	驱动晶闸管或 IGBT 模块。实现用于栅极驱动、温度和电压测量的逻辑。也称为子模块	每个 IGBT 或晶闸管子模块都有一个关联的栅极驱动单元。栅极驱动板的数量取决于转换器电压和额定功率。
阀控制	一系列子模块以串联方式构成阀。阀控制电子器件用于向栅极驱动板控制提供命令。	每个阀可能包含一个或多个阀控制电子器件，具体取决于 HVDC 额定值。
转换器和极控系统	一个转换器桥由 6 个或更多的阀组成。转换器控制系统会计算所需的电气参数并向阀控制提供所需的控制命令。极控负责管理电网交流电压来维持配置的直流输出电压。	转换器和极控电子器件是控制和保护面板的一部分。多个数字信号处理模块集成为转换器和极控模块。通过提供冗余来提升性能和可靠性。
站级控制和保护	通过控制电容器组和滤波器来控制谐波和无功功率。在正常和异常运行期间保护 HVDC 站	控制和保护面板的一部分。多个数字信号处理模块集成为转换器和极控模块。通过提供冗余来提升性能和可靠性。
通信交换机	使用基于高速光纤的以太网接口连接到 HVDC 站内的不同系统	控制和保护面板的一部分。使用多个冗余通信交换机。
模拟输入/输出 (I/O) 模块	用于测量 HVDC 线路、换流变压器、电抗器、断路器、电容器组和滤波器的电气参数以提供保护和监测	与靠近待监测设备的 HVDC 站连接在一起，数字取决于额定功率

## 5 TI 的 HVDC 输电站控制和保护解决方案

TI 提供各种模拟、功率、接口、隔离、处理器、MCU 和 DSP 解决方案，可供客户在设计 HVDC 板或模块器件时采用。图 5-1 中显示了不同 HVDC 模块的一些重点解决方案。

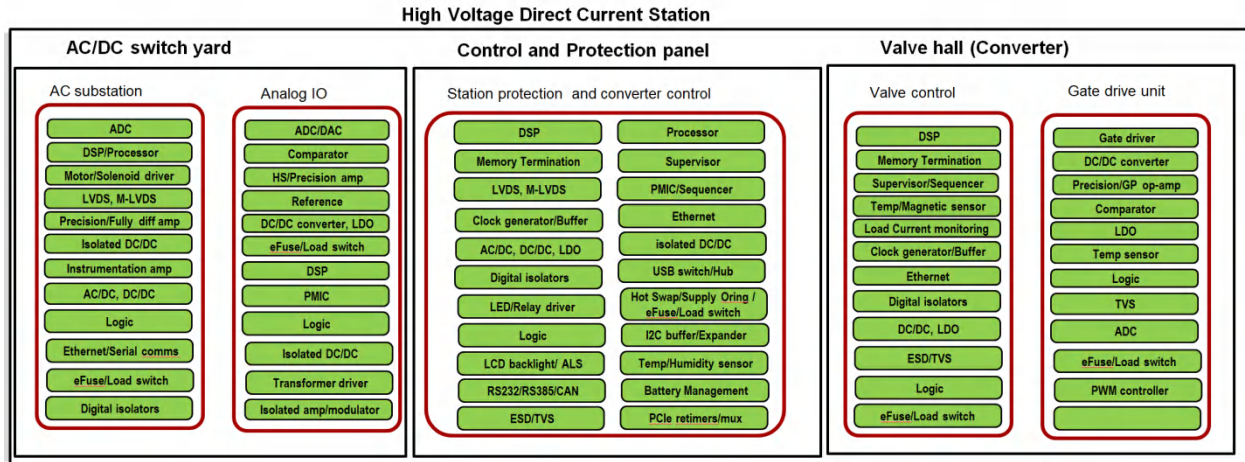


图 5-1. HVDC 输电控制和保护 - TI 解决方案

### 5.1 TI 产品

有关 TI 产品的详细信息，请参阅以下部分的链接。

#### 5.1.1 模拟

TI 为环境监测提供各种各样的模拟设计方案产品，涵盖精密或高速 ADC、精密或高速放大器、高速比较器以及传感器。以下链接提供了这些产品的相关信息。

- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/data-converters/adc-circuit/precision-adcs/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/amplifier-circuit/op-amps/precision/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/amplifier-circuit/special-function/fully-differential/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/amplifier-circuit/current-sense/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/amplifier-circuit/comparators/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/sensors/overview.html>

#### ADS8588H

ADS8588H 器件是基于 16 位逐次逼近型 ( SAR ) 模数转换器 ( ADC ) 的 8 信道集成数据采集 ( DAQ ) 系统。所有输入信道均同时采样，以实现每信道 500kSPS 的最大吞吐量。

#### 5.1.2 嵌入式处理

TI 提供了一系列嵌入式处理器解决方案，包括用于控制/保护算法处理的 DSP 以及用于实现标准通信协议和用户接口的基于 ARM 的处理器。以下链接提供了这些产品的相关信息。

- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/overview.html#portfolio>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/processors/digital-signal-processors/c6000-floating-point-dsp/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/processors/sitara-arm/overview.html>

## 66AK2HXX

66AK2Hxx 平台采用 KeyStone II 架构将四个 ARM Cortex-A15 处理器与多达八个 TMS320C66x 高性能 DSP 结合在一起。66AK2H14/12/06 提供高达 5.6GHz 的 ARM 和 9.6GHz 的 DSP 处理速度，同时兼具安全性、数据包处理和以太网交换功能，而且功耗低于多芯片解决方案。

### 5.1.3 电源和栅极驱动器

TI 提供一系列电源解决方案，包括交流/直流、直流/直流、栅极驱动器、隔离式电源模块和 LDO。以下链接提供了这些产品的相关信息。

- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/power-management/power-switches/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/power-management/gate-drivers/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/power-management/gate-drivers/isolated-gate-drivers/products.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/power-management/offline-isolated-dcdc-controllers-converters/isolated-power-converters/products.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/power-management/offline-isolated-dcdc-controllers-converters/pwm-resonant-controllers/products.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/power-management/non-isolated-dc-dc-switching-regulators/step-down-buck/buck-modules-integrated-inductor/power-modules-portfolio.html>

## LMZ30604

LMZ30604 电源模块是一款易于使用的集成式电源解决方案。它在一个薄型 QFN 封装内整合了一个带有功率 MOSFET 的 4A 直流/直流转换器、一个屏蔽式电感器和多个无源器件。此整体电源解决方案仅需三个外部组件，并省去了环路补偿和磁性元件选择过程。

### 5.1.4 高速板载接口和外部通信

TI 针对低速及高速通信板载和外部接口提供一系列接口解决方案。以下链接提供了这些产品的相关信息。

- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/interface/ethernet/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/interface/usb/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/interface/lvds-m-lvds-pecl/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/interface/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/wireless-connectivity/simplelink-solutions/sub-1-ghz/products.html#p1694=Smart%20RF%20Transceiver;UHF%20Transceiver>

## SN65LVDS047 和 SN65LVDS048A

SN65LVDS047 是一款四路差分线路驱动器，可实现低压差分信号传输 (LVDS) 的电气特性。SN65LVDS048A 是一款四路差分线路接收器，可实现低压差分信号传输 (LVDS) 的电气特性。

## DP83869

DP83869HM 器件是一款集成了 PMD 子层的稳健全功能千兆位物理层 (PHY) 收发器，支持 10BASE-T<sub>e</sub>、100BASE-TX 和 1000BASE-T 以太网协议。DP83869 还支持 1000BASE-X 和 100BASE-FX 光纤协议。

### 5.1.5 板级隔离和保护

TI 提供一系列具有基本或增强型隔离的模拟或数字隔离设计方案。以下链接提供了这些产品的相关信息。

- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/isolation/digital-isolators/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/isolation/isolated-interfaces/rs-485-transceivers/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/isolation/isolated-interfaces/can-transceivers/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/isolation/transformer-drivers/products.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/isolation/isolated-amplifiers/overview.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/interface/circuit-protection/esd-by-interface.html>
- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/interface/circuit-protection/overview.html>

#### ISO224

ISO224 是一款精密的隔离放大器，其输出与输入电路由提供高达 5kV<sub>RMS</sub>、使用寿命极长且功率耗散低的隔离栅隔开。ISO224 的输入专门针对在工业应用中广泛使用的  $\pm 10V$  信号的精确检测进行了优化。该器件可在高侧实现单电源工作。这项独有特性能够简化隔离电源的设计，同时降低系统成本。其集成的高侧电源电压检测功能可简化系统级诊断工作。

#### UCC12050

UCC12050 是一款具有 5kV<sub>RMS</sub> 增强型隔离额定值的直流/直流转换器，旨在为需要偏置电源及稳压输出电压的隔离电路提供高效的隔离式电源。该器件集成了具有专有架构的变压器和直流/直流控制器，可提供 500mW (典型值) 的隔离功率，并具有较高的效率和低 EMI。该器件还具有使能引脚、同步功能以及 5V 或 3.3V 稳压输出选项 (带净空电压)。UCC12050 是一款薄型小型化解决方案，采用高度为 2.65mm (典型值) 的宽体 SOIC 封装。

#### AMC3301

AMC3301 是一款具有完全集成的隔离式直流/直流转换器的隔离式精密放大器，能够实现器件低侧的单电源运行。AMC3301 的输入端经过优化，可直接连接到分流电阻器或低电压电平信号。集成的隔离式直流/直流转换器使得该器件成为空间受限型应用的独特解决方案。

#### ISO774x

ISO774x 器件是高性能四通道数字隔离器，可提供符合 UL 1577 的 5000V<sub>RMS</sub> (DW 封装) 和 3000V<sub>RMS</sub> (DBQ 封装) 隔离额定值。在隔离 CMOS 或 LVCMOS 数字 I/O 时，ISO774x 器件可在低功耗下提供高电磁抗扰度和低辐射。每条隔离通道的逻辑输入和输出缓冲器均由双电容二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 绝缘栅相隔离。如果输入功率或信号出现损失，不带后缀 F 的器件默认输出高电平，带后缀 F 的器件默认输出低电平。

#### ISOW64xx、ISOW3080、ISOW1050

ISO-Watt 系列器件 (ISOW64xx、ISOW3080、ISOW1050) 是将直流/直流转换器集成于单颗芯片内的信号隔离器。无需额外搭建隔离供电电路，可大幅简化电路设计与布线流程，同时有效节省空间并降低成本。此外，该系列器件在设计层面充分兼顾出色的电磁兼容表现。其中 ISOW64xx 为集成电源型数字隔离器，ISOW3080 为集成电源型隔离 RS485 收发器，而 ISOW1050 则为集成电源型隔离 CAN 收发器。全系采用强化隔离设计，隔离耐压 V<sub>ISO</sub> 高达 5000V<sub>RMS</sub>。此

## 6 总结

HVDC 具备损耗更低、输电距离更长等优势。对于大规模长距离电力输送，输电公司正在从 HVAC 转换到 HVDC。TI 针对 HVDC 输电系统中使用的终端设备提供了模拟、数字、接口和保护产品与参考设计解决方案。除了 HVDC 站控制和保护设备外，HVDC 站中还集成了用于环境监测、阀冷却、除冰、烟雾检测和安防的其他设备。

## 7 TI 参考设计

- [基于高效、低辐射、隔离式直流/直流转换器的模拟输入模块的参考设计](#)

该参考设计是一个用于为隔离式放大器生成隔离电源以测量隔离式电压和电流的简化架构。一个具有增强隔离功能且完全集成的直流/直流转换器，采用 5V 输入并提供可配置的 5V 或 5.4V 输出（低压降稳压器（LDO）的裕量），能够产生隔离式电力。与配置为通道隔离输入的  $\pm 50\text{mV}$  输入范围隔离放大器连接的分流器可以测量电流。与配置为组隔离输入的  $\pm 250\text{mV}$  或  $\pm 12\text{V}$  输入范围隔离放大器连接的分压器输出可以测量电压。隔离放大器的输出直接连接到 24 位  $\Delta$ - $\Sigma$  模数转换器（ADC），或者使用增益放大器将输出缩放至  $\pm 10\text{V}$ ，并连接到 16 位 SAR ADC 以进行性能评估。板载数字诊断可提高可靠性并增强系统性能。

- [适用于保护继电器模块且具有诊断功能的非隔离式电源架构的参考设计](#)
- [适用于保护继电器处理器模块的高效电源架构的参考设计](#)

该参考设计是一个用于为隔离式放大器生成隔离电源以测量隔离式电压和电流的简化架构。一个具有增强隔离功能且完全集成的直流/直流转换器，采用 5V 输入并提供可配置的 5V 或 5.4V 输出（低压降稳压器（LDO）的裕量），能够产生隔离式电力。与配置为通道隔离输入的  $\pm 50\text{mV}$  输入范围隔离放大器连接的分流器可以测量电流。与配置为组隔离输入的  $\pm 250\text{mV}$  或  $\pm 12\text{V}$  输入范围隔离放大器连接的分压器输出可以测量电压。隔离放大器的输出直接连接到 24 位  $\Delta$ - $\Sigma$  模数转换器（ADC），或者使用增益放大器将输出缩放至  $\pm 10\text{V}$ ，并连接到 16 位 SAR ADC 以进行性能评估。板载数字诊断可提高可靠性并增强系统性能。

- [用于为电网应用提供瞬态保护且基于平缓钳位 TVS 的参考设计](#)
- [采用光纤或双绞线接口、符合 EMI/EMC 标准的 10/100Mbps 以太网砖型模块的参考设计](#)
- [适用于电网应用的铜缆转光纤 100BASE-FX 或 1000BASE-X 介质转换器的参考设计](#)

此参考设计详细说明了使用 DP83849 评估板实现 10/100BASE-TX 转 10/100BASE-FX 介质转换器的方法，该方法可将铜制旧设备轻松连接到光纤网络。铜制以太网（10/100BASE-TX）已广泛用于局域电网，但通信距离有限。光纤网络已相当成熟，且成本持续下降。电力公司采用光纤网络来管理广域设备已变得可行并具有成本效益，光纤网络可带来更高的速度、更长的覆盖距离、更可靠的通信。

- [三级三相 SiC 交流/直流转换器的参考设计](#)
- [适用于具备短路保护功能和外部 BJT 缓冲器的并联 IGBT 的 IGBT 栅极驱动器的参考设计](#)
- [采用小型  \$\Delta\$ - \$\Sigma\$  调制器的增强型隔离式相位电流检测的参考设计](#)
- [具有电流、电压和设计指南的增强型隔离式三相逆变器的参考设计](#)

## 8 其他参考内容

- <http://www.ti.com.cn/zh-cn/applications/industrial/grid-infrastructure/overview.html>
- 德州仪器 (TI) : *系统级 ESD 保护指南*
- 德州仪器 (TI) : *利用集成电源与数字隔离设计提升设计性能* , 应用手册
- [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/industrial\\_strength/archive/2017/03/07/exploring-high-voltage-transmission-part-1-line-commutated-converters](https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2017/03/07/exploring-high-voltage-transmission-part-1-line-commutated-converters)
- [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/industrial\\_strength/archive/2017/03/14/exploring-high-voltage-transmission-part-2-voltage-source-converters](https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2017/03/14/exploring-high-voltage-transmission-part-2-voltage-source-converters)
- 德州仪器 (TI) : *对两种不同的栅极驱动电流提高方法的比较分析*

## 9 Revision History

<b>Changes from Revision B (September 2021) to Revision C (May 2026)</b>	<b>Page</b>
• 更新了标题.....	0
• 添加了器件相关段落.....	15
• 添加了参考文献.....	18

<b>Changes from Revision A (June 2020) to Revision B (September 2021)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	2

<b>Changes from Revision * (May 2020) to Revision A (June 2020)</b>	<b>Page</b>
• 对节 1.1 进行了更新。.....	2
• 对节 1.2.1 进行了更新。.....	2
• 对节 2.2.2.1 进行了更新。.....	7
• 对节 6 进行了更新。.....	16

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月