

详解电力系统新技术

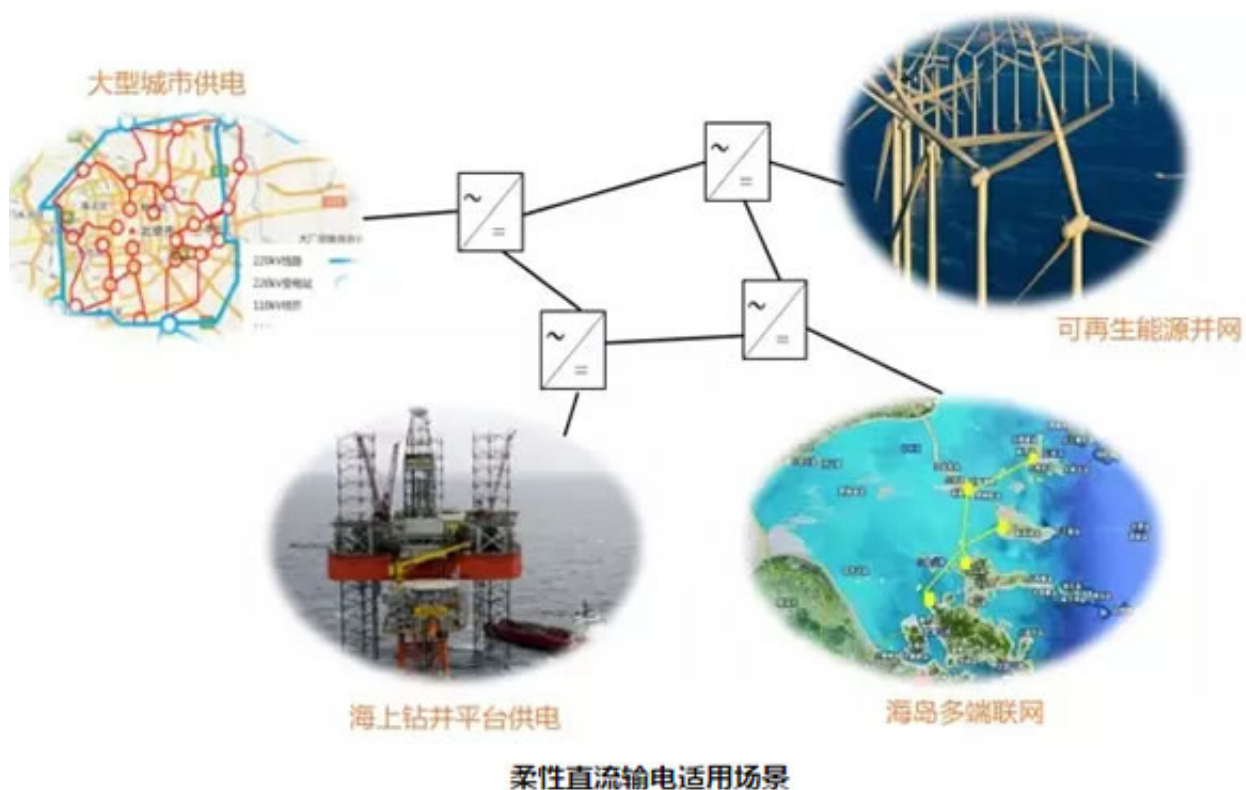
大规模新能源开发和集中接入、送出，特高压直流的快速发展和集中接入是我国电力系统发展的新特点，如何确保大电网运行更加安全稳定，我们的电力科研人员一直在努力。

01. 柔性直流技术

是20世纪90年代发展起来的一种新型直流输电技术，国际上也称为轻型直流输电(HVDC Light)、新型直流输电(HVDC Plus)，国内将其命名为“柔性直流输电”。

“柔性”一词来源于英文Flexible，表示应用先进的电力电子技术为电网提供灵活的控制手段。

柔性直流输电技术以电压源换流器、自关断器件和脉宽调制(PWM)技术为基础，具有响应速度快、可控性好、运行方式灵活、可向无源网络供电、不会出现换相失败、换流站间无需通信以及易于构成多端直流系统等优点，适用于可再生能源并网、分布式发电并网、孤岛供电等。



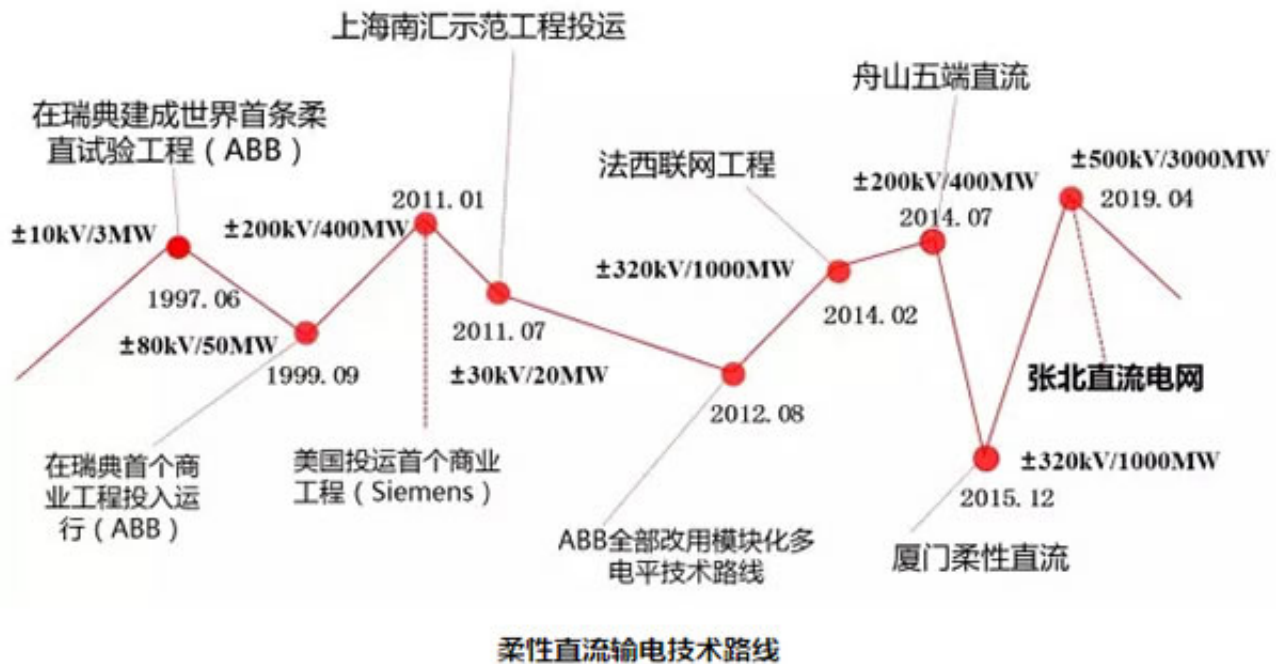
	常规直流输电	柔性直流输电
传输功率	±800kV/8000MW	±320kV/1000MW
无功补偿	输送容量的 40~60%	不需要，并可以根据需要向系统提供无功
潮流控制	只能控制有功	有功、无功可分别控制
接入特性	强交流系统	可接弱系统或无源系统
构成多端	较难	容易
器件使用	晶闸管（8.5kV/5kA）	IGBT（3.3kV/1.5kA）

柔性直流与常规直流的特性对比

国家电网公司于2011年7月投运上海南汇风电场柔性直流输电工程，这是亚洲首个具有自主知识产权的柔直工程，直流电压 ± 30kV，换流站容量18MW。

在柔性直流输电技术的基础上，进一步构成多端柔性直流输电系统，可携带来自多个站点的风能、太阳能、地热能等清洁能源，通过大容量、长距离的电力传输通道，到达多个城市的负荷中心。

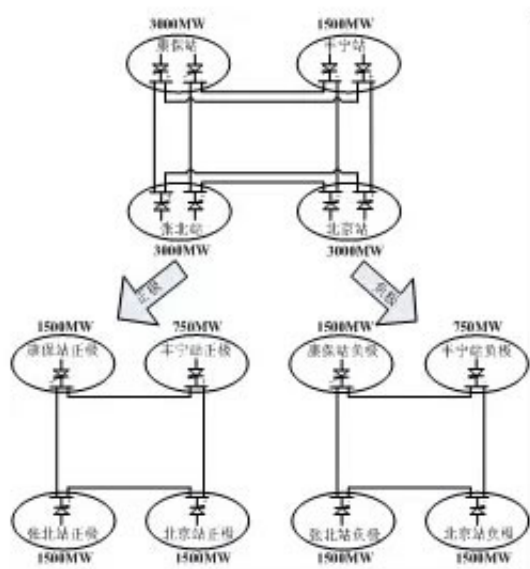
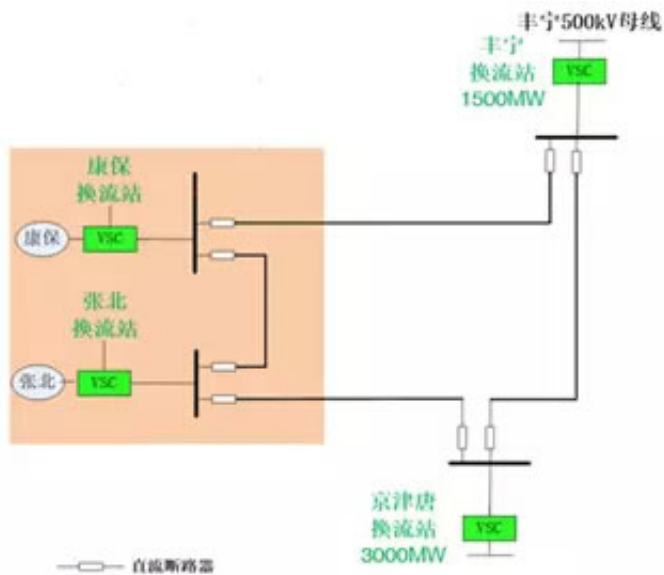
2014年，国家电网公司在浙江舟山建设了世界首个五端柔性直流输电工程，采用 ± 200千伏直流电压，分别在定海、岱山、衢山、洋山、泗礁建设一座换流站，容量分别为40万千瓦、30万千瓦、10万千瓦、10万千瓦、10万千瓦，实现多个海上风电场同时接入和电力输送。



进一步研发和构建柔性直流电网，以多能源基地大范围直流互连为主要特征，为实现未来风、光电力能源大基地外送提供可靠技术保证。

国家电网公司目前规划在张家口国家级新能源综合示范区和冬奥专区建设张北可再生能源 ± 500 千伏柔性直流电网示范工程（以下简称“示范工程”），构建输送大规模风、光、抽蓄等多种能源的4端环形柔性直流电网，预计2019年投运。

落点分别在河北的张北县、康保县、丰宁县和北京的延庆区，张北、康保换流站为送端，丰宁换流站为调节端，北京换流站为受端。张北、康保、丰宁、北京换流站容量分别为300万千瓦、150万千瓦、150万千瓦、300万千瓦。



张北±500千伏柔性直流电网示范工程示意图

示范工程系统接线采用双极方式，正负极均可独立运行，相当于两个独立环网。一极发生故障后，通过极控系统，另一极在设备通流能力允许情况下，可以转带故障极功率。

示范工程系统接线采用双极方式，正负极均可独立运行，相当于两个独立环网。一极发生故障后，通过极控系统，另一极在设备通流能力允许情况下，可以转带故障极功率。

建设柔性直流环形电网，

一是可靠性高，可实现故障后的潮流转移；

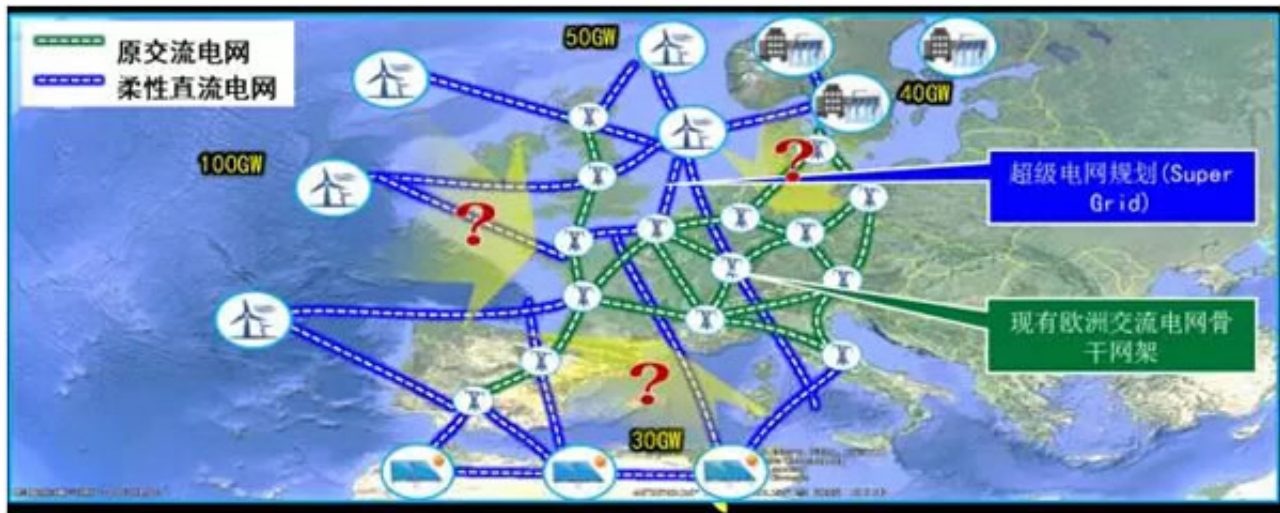
二是灵活性好，可实现多种能源灵活交互，提升利用效率；

三是扩展性好，易于在送受端扩展新落点。

通过在张北构建柔性直流环形电网，可以实现大规模光伏、风能的昼夜互补，以及新能源与储能电源的灵活能量交互，形成稳定可控的电源送至受端电网，解决大规模新能源接入后的系统调峰问题，减小间歇性能源对受端交流电网的扰动冲击，实现新能源的“友好接入”。

在欧洲，为了将北海和大西洋的远海风电、芬兰和挪威的水电、非洲北部的太阳能接入电网，规划并实施了基于柔性直流技术的全新输电网，用来实现大范围可再生能源的优化配置。

预计在未来10年内欧洲将建设20条以上的柔性直流工程，用于实现各个国家之间的互联和可再生能源的并网互补。英国、美国也均已规划了多条柔性直流输电工程，在未来20年逐步构建柔性直流电网，以满足其可再生能源发展的需求。



欧洲超级电网规划

02. 虚拟同步机技术

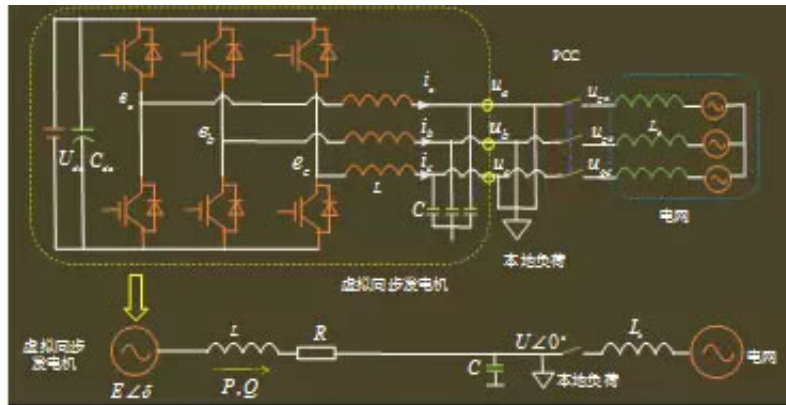
为应对能源问题和环境压力，社会对能源使用效率的要求不断提高；同时，风能、太阳能等分布式能源大规模地接入电网，一般说来，分布式电源主要通过并网逆变器接入电网，并网逆变器控制策略各异，加之分布式电源输出功率具有波动性、不确定性等特点，很难实现其即插即用与自主协调运行。如何保证这些新接入的分布式能源与电力系统兼容成为当务之急。

100多年以来，电力系统的规模不断变大，这主要归功于同步发电机的同步机制。如果能使并网逆变器具有类似同步发电机的运行特性，那么必将大幅提升分布式发电的并网安全性与运行适应性，提高高比例新能源电力系统的稳定性。

虚拟同步机正是这样一种技术，它使得并网逆变器能够模拟同步发电机的运行机理、有功调频以及无功调压等特性，使并网逆变器从内部运行机制和外部运行特性上可与传统同步发电机一样，从而能够促进风电、光伏发电上网的稳定性、安全性，防止脱网；可实现追踪电网运行，自动分摊功率，阻尼电网电压和频率过快波动，对电网有天然友好性、全网唯一频率运行，真正实现“同步”。



目前有光伏虚拟同步机、风机虚拟同步机、储能虚拟同步机以及负荷虚拟同步机等几种应用形式，也有文献披露在能量路由器和HVDC中的应用。虚拟同步机技术可以很好地解决分布式电源与电网的兼容性问题。



$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d \\ \quad = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \\ T_e = \frac{P_e}{\omega} = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega} \end{cases}$$

虚拟惯性J的存在：功率和频率的动态过程中具有了惯性

阻尼系数D的存在：具有阻尼系统功率振荡的能力

虚拟同步机主要技术特性

自主有功调频控制

有功频率控制即有功频率下垂控制，根据机端频率按照下垂曲线调整有功功率输出，模拟同步机的一次调频特性。

自主无功调压控制

无功调压控制即无功电压下垂控制，根据机端电压按照下垂曲线调整无功功率输出，模拟同步机的无功电压调节能力。

虚拟惯量控制

虚拟惯性控制即模拟同步发电机转子机电暂态摇摆过程的控制，利用储能装置来缓冲逆变器直流侧与交流侧的功率不平衡。

惯量频率支撑

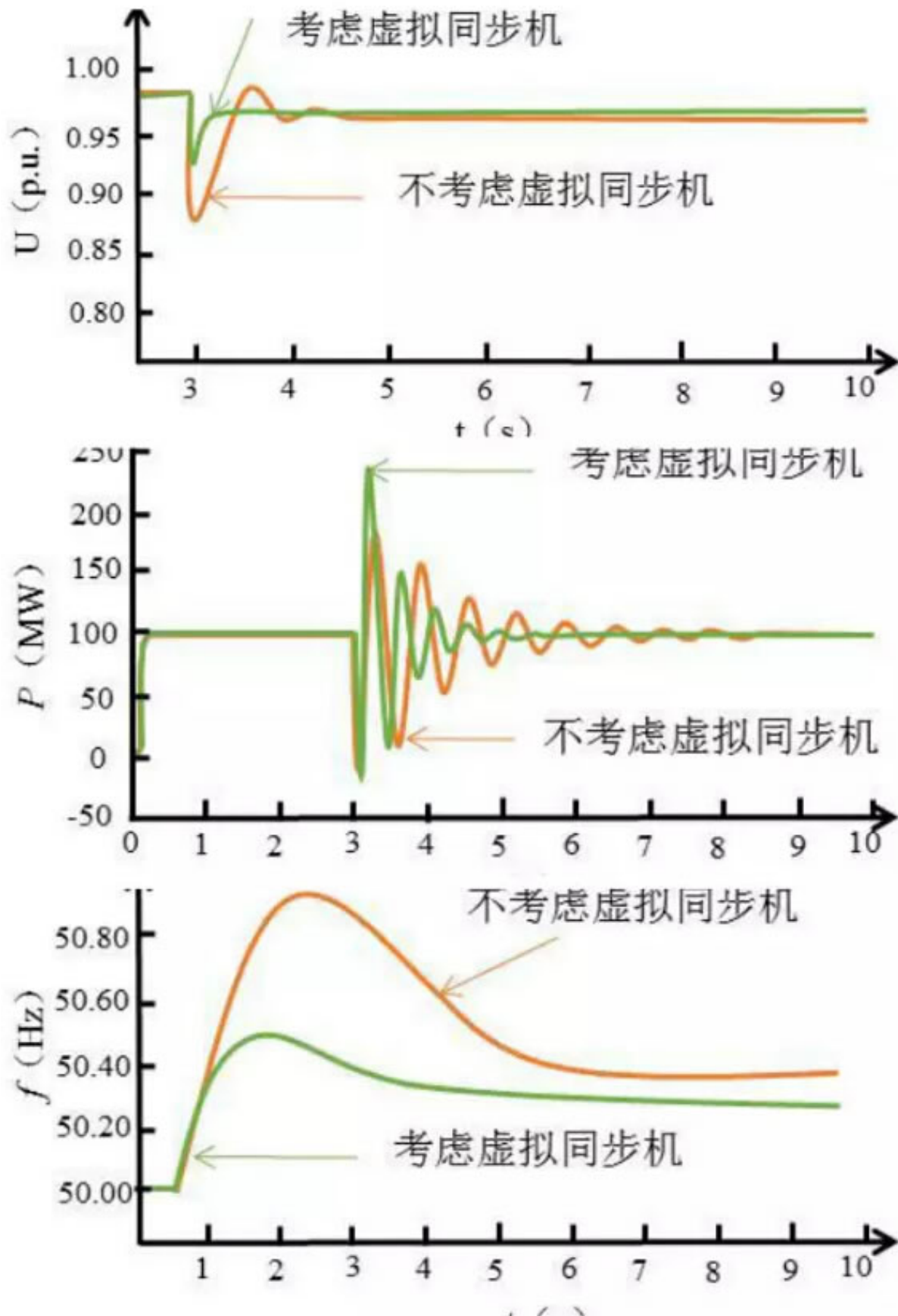
当高渗透率新能源系统发生较大功率缺额时，需要新能源虚拟同步机模拟传统同步机对系统频率的惯量支撑能力，缓解系统频率下降速率。

虚拟阻尼控制

阻尼控制是模拟同步发电机电气阻尼特性的控制，通过控制惯量储能单元存储或释放能量等方式实现阻尼振荡，可以用来阻尼虚拟同步机与系统的机电振荡，提高动态稳定性。

目前国家电网公司规划在张北风光储输基地开展示范工程建设，建设世界容量最大的虚拟同步机示范工程。

通过对现有风机、光伏发电的逆变器和控制系统进行改造，新建大容量集中式虚拟同步机，计划2017年年底建成。虚拟同步机大规模应用后可加快功频振荡的平息速度，减轻系统故障对电网电压、频率的影响，提升系统暂态稳定水平。



张北虚拟同步机大规模应用后对系统的影响

未来的电力系统在采用虚拟同步机技术后，发电设备和负荷能够通过内在的同步机制自主交互，在不需要人工调节的情况下就可以实现系统的稳定运行。

虚拟同步机技术改变了原来仅由发电端调节的单向模式，实现了负荷端和发电端的双向调节模式。

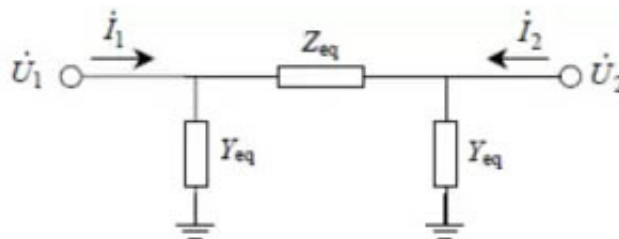
03.半波长输电技术

我国的一次能源基地与负荷中心相距甚远，如新疆煤电基地、西藏水电基地到东部负荷中心的距离约3000km。对超远距离、超大容量的电力输送，半波长输电技术(Half-Wave-Length AC Transmission, HWACT)成为一种可行的解决方案。

由电路原理可知，输电本质上波的传播过程，当线路足够长时，在传输功率极限和沿线电压分布等方面会出现许多与常规输电线路不同的特性。

半波长输电正是根据交流线路长度等于一个工频半波，即3000公里（50Hz）时，输送功率极限可以达到无穷大这一特性而确定的输电方式（适用于理想的无损线路）。

基于传输线和二端口理论推导出可用于工程计算的特高压半波长交流线路的准稳态模型。输电线路的正序参数可以等效为 π 形二端口形式。



传输线二端口 π 形等值线路

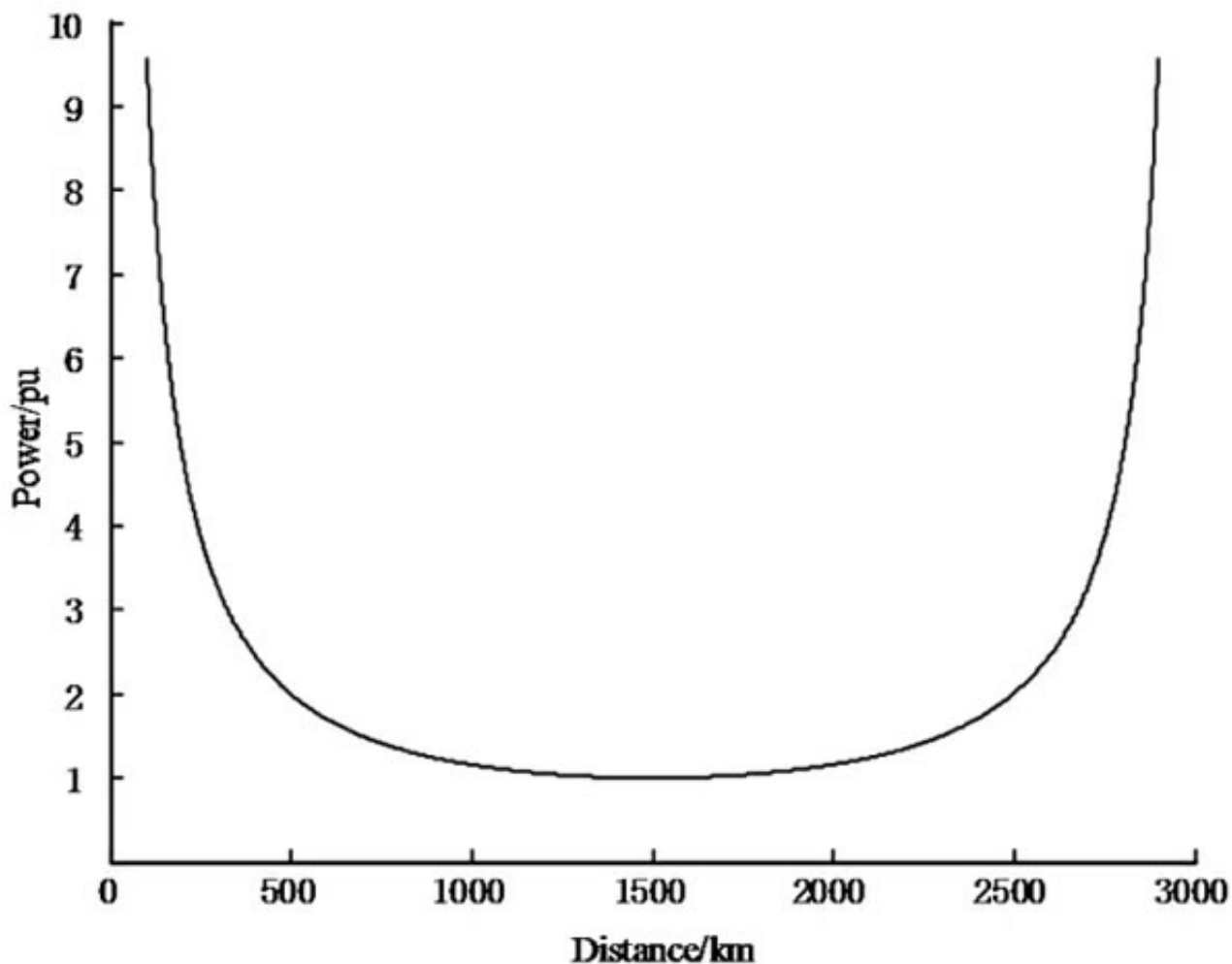
无损线路首、末端的有功功率和无功功率方程为：

$$\begin{cases} P_1 = \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{Z_c \sin \beta l} \\ Q_1 = \frac{U_1^2 \cos \beta l - U_1 U_2 \cos \delta}{Z_c \sin \beta l} \\ P_2 = \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{Z_c \sin \beta l} \\ Q_2 = \frac{U_2^2 \cos \beta l - U_1 U_2 \cos \delta}{Z_c \sin \beta l} \end{cases}$$

式中 δ 为首末端电压相位差，当 $\sin \delta = 1$ 时，线路传输的有功功率最大，即线路的功率极限为：

$$P = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \beta l}$$

以自然功率为基准值，不同线路长度下的极限传输功率特性如下图所示，当 $\beta l = \pi$ 或0时，即 $l=0$ 或3000km时，理论上功率极限趋于无穷大。因此半波长输电线路的理论传输功率远大于常规线路。



从理论分析上看，当输送距离为半波长时，输电特性等同于一条极短电气距离的输电线路。理论上输电功率可达到无穷大。

但实际的输送功率要受到沿线电压分布和线路绝缘水平等因素的制约。

对于理想半波长输电，首端和末端的电压、电流幅值都相等，相位差 180° 。

因此，末端电压和末端电流之间的夹角与首端电压和首端电流之间的夹角相同，电源与负荷之间的电气距离接近于零，经半波长交流输电的远方电源在某些电气特性上几乎等同于受端本地电源。

对无损半波输电线路来说，输电过程既不消耗和吸收有功，也不消耗和吸收无功，有功和无功都无损地从首端传到末端。

半波长输电技术应用场景

点对网远距离大容量输电

输电能力可达到550万千瓦左右。考虑半波长输电自身特点，远方电源的电气特性相当于就地电源，可实现全线无功自平衡，无需安装无功补偿设备，全线无需设置中间开关站，可以和直流输电系统一样实现点对点或点对网输电，但在输电距离方面不如直流输电灵活。未来还可用于6000km、9000km甚至12000km的输电距离。

送端电网与受端电网之间的联网

初步的经济性比较研究表明，半波长输电与直流输电相比，单位容量年费用具有一定的优势或持平。但值得指出的是，半波长线路不可与普通长度的线路并联。

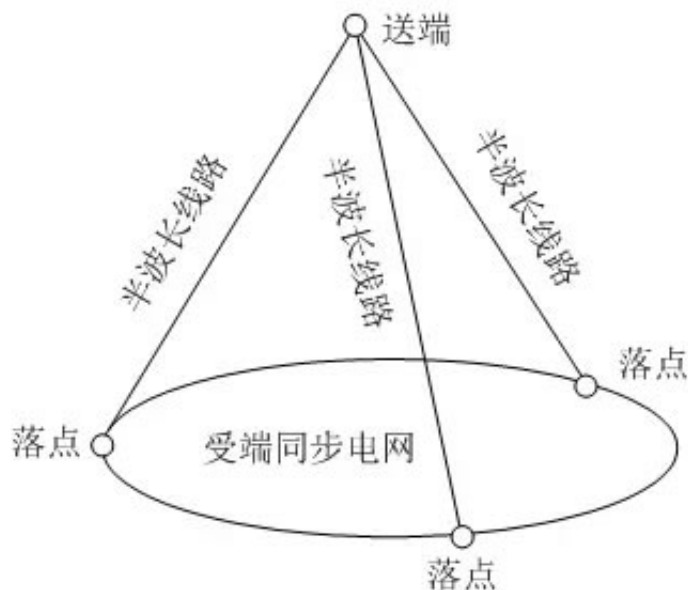
但值得指出的是，半波长线路不可与普通长度的线路并联。

可利用半波长点对网双落点线路进行立体电网构建。

利用半波长线路电气距离近似为 0

的特性，通过两(多)条起点相同的半波长线路分别落点至受端电网不同的点，即可将受端电网内 2(多)个相隔较远的落点通过半波长线路及其共同送端联接在一起，构建“立体电网”。

“立体电网”可极大改变电网形态，大大缩短落点之间的电气距离，将显著改变同步电网的结构，明显改善同步电网的稳定性，提高同步电网内部发电机的直接同步功率支援能力。



04.调相机技术

同步调相机的结构基本上与同步电动机相同，不带机械负载也不带原动机，在需要时向系统快速提供或吸收无功功率。

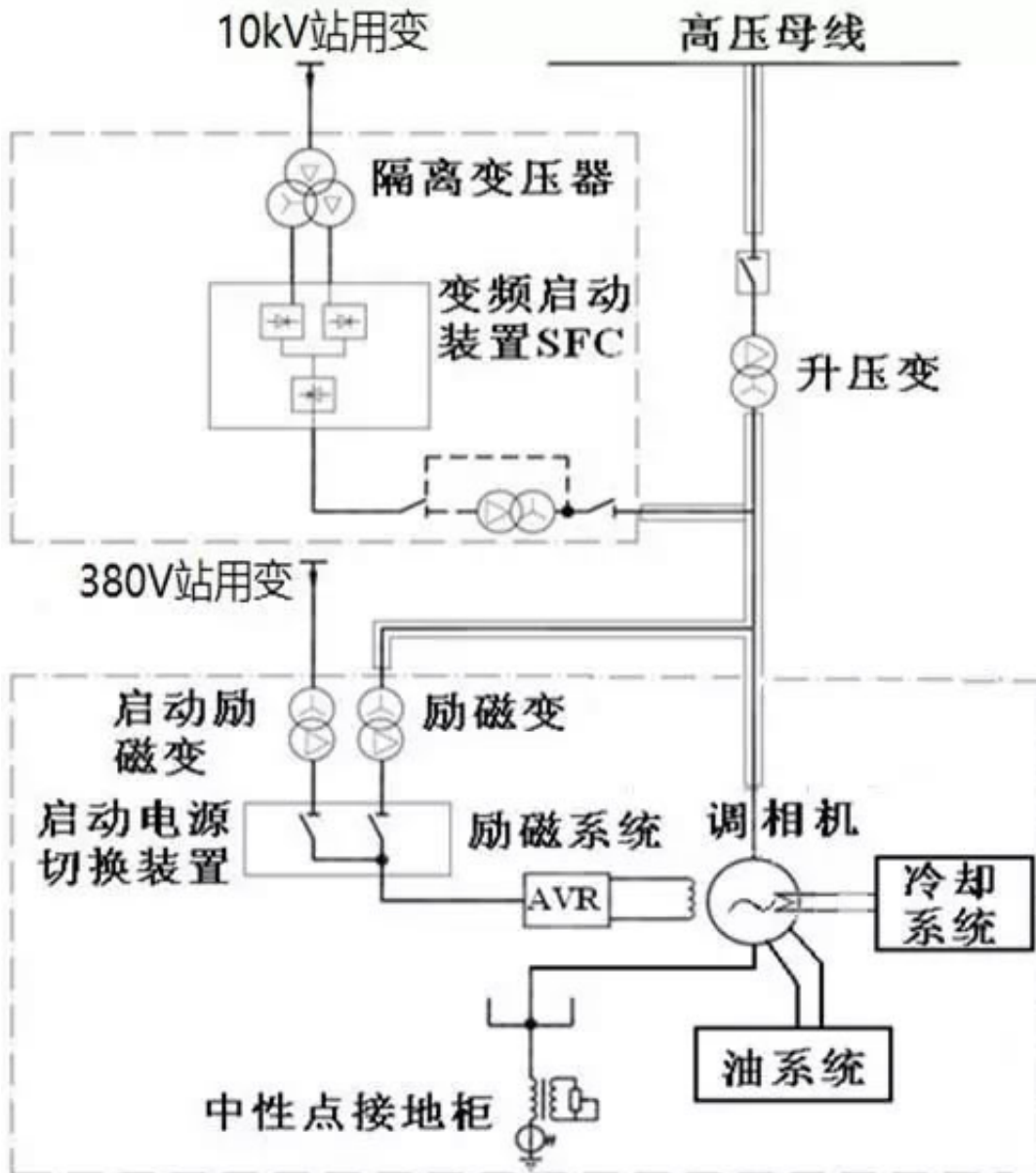
在我国电网发展过程中，如省间联网初期，由于电压等级低、输电距离远（多采用220kV线路远距离输电），系统功角和电压稳定问题突出，通过在受端电网配置调相机来提高系统稳定性。

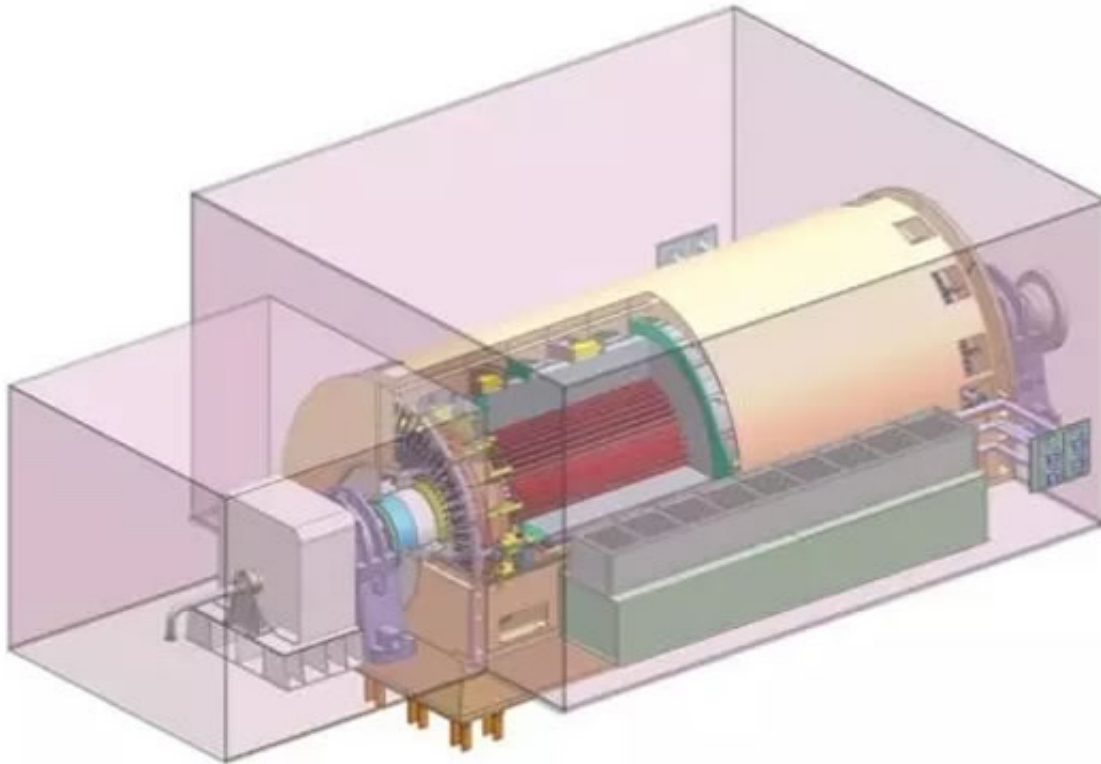
上世纪八十年代以来，500kV电网发展加快，受端电网装机容量快速增加，替代了调相机作用，系统稳定性显著提高。随着调相机设备老化，逐渐退出了电网运行。

国外从上世纪五十年代开始有多个国家应用调相机提高系统的稳定性。如瑞典、阿根廷、加拿大、埃及、巴西等国家在大规模水电基地远距离外送的受端变电站加装调相机。法国、日本电网早期使用调相机较多，随着电网网架加强和电源增加，法国调相机没有新的增加。日本东京地区在1987年7月23日发生静态电压崩溃事故后，增加了抽水蓄能、调相机和SVC等动态无功补偿装置。

随着我国特高压直流的快速发展、清洁能源的大规模开发、大比例受电地区的集中出现，电网特性发生较大变化，部分地区动态无功储备下降、电压支撑不足的问题愈发突出，电压稳定问题成为大电网安全稳定的主要问题之一。客观要求直流大规模有功输送，必须匹配大规模动态无功，即“大直流输电、强无功支撑”。为提高电网动态无功补偿能力，增加地区电网动态无功储备水平，有效解决电压支撑不足的问题，需要在电网中加装调相机等动态无功设备，提高电网动态无功补偿能力。

目前国内的电机设备制造厂商正在积极研制新型调相机，具备大容量（额定容量最大300Mvar）、少维护的特点，同时其瞬时无功输出能力、暂态无功响应速度及过载能力相比传统调相机大大提高，是提升电网运行安全性、满足系统稳定要求的新一代设备。





调相机系统组成:

调相机本体、励磁系统、升压变、起动系统、冷却系统、油系统、控制保护系统

调相机技术特点：

技术优点

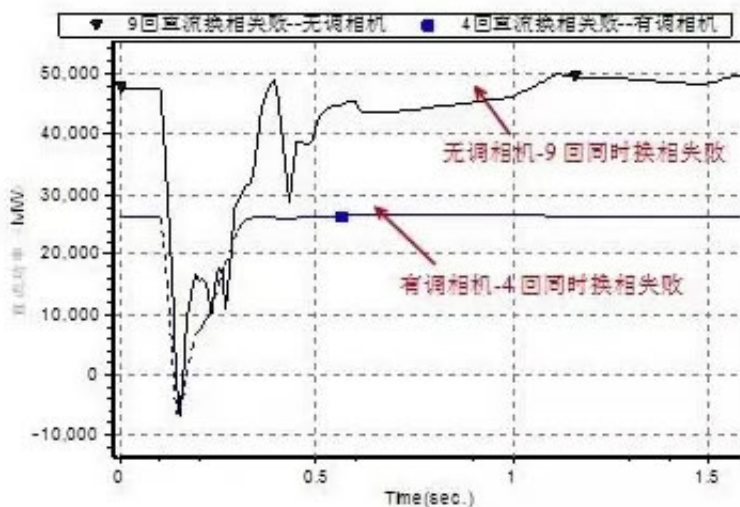
- 1.具备过载能力且无功输出受系统电压影响小。在强励作用下可短时间内发出超过2倍额定容量的无功，并且对于持续时间较长的故障可提供较强的无功支撑。
- 2.具备次暂态特性。能够在故障发生瞬间发出/吸收大量瞬时无功，支撑电网电压，抑制直流换相失败/工频过电压等。
- 3.具备深度进相能力。调相机最大进相能力约为额定容量的2/3。
- 4.运行稳定性好。调相机基于传统的同步电机技术，设备和控制技术成熟，抗干扰能力强，运行经验丰富。
- 5.使用寿命长，占地面积小。调相机使用寿命约30年，占地面积约为同容量SVC的1/3。

技术缺点

- 1.增加短路电流。故障时调相机将向系统输出短路电流，不适用于短路电流问题突出的电网。
- 2.旋转设备运维相对复杂，功率损耗不高于1.5%。
- 3.调相机调节速度要慢于SVC、STATCOM，调相机从正常无功出力至输出最大强励无功功率的时间约1.2s。

目前国家电网公司规划在多个已投运/在建的特高压直流工程送受端换流站或近区电网，以及北京、西藏地区电网共加装约多台调相机，以满足系统动态无功需求。以华东电网为例，在长三角地区加装12台调相机，可有效地减少多回直流同时换相失败的机率。

变电站名称	调相机容量 (Mvar)
奉贤换流站	2×300
苏州换流站	2×300
政平换流站	4×300
南京换流站	2×300
泰州换流站	2×300



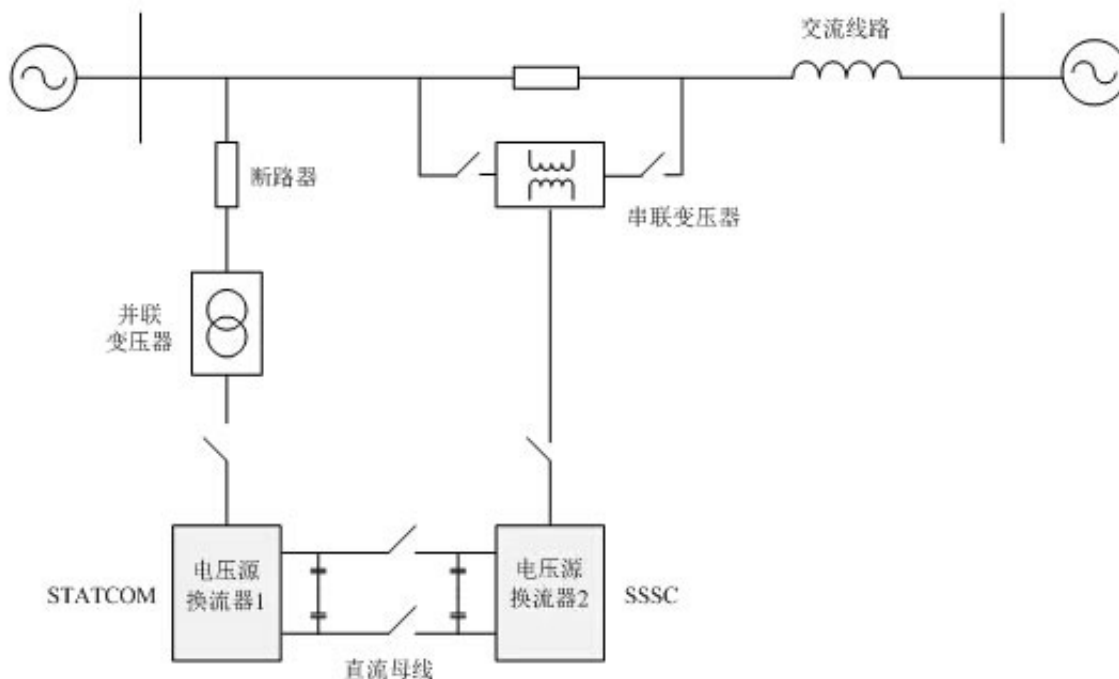
05.统一潮流控制器

统一潮流控制器 (unified power flow controller, UPFC) 的概念最早由美国Westinghouse公司的L. Gyugyi在1992年提出，是迄今为止功能最全面的FACTS装置。

UPFC由两个（或多个）共用直流部分的电压源换流器分别以并联和串联的方式接入输电系统，可以同时或选择性地控制输电线路的电压、阻抗、相位，实现线路有功、无功潮流控制，并可提供独立可控并联无功补偿。UPFC具有灵活控制系统潮流、提高电网传输能力及改善系统稳定性等多种功能。

技术原理：

典型的UPFC装置结构如下图所示，由两个背靠背、共用直流母线的电压源换流器构成。其中，换流器1、换流器2对应的换流变压器分别以并联、串联形式接入，有功功率可以在两个换流器之间双向流动，每个换流器的交流输出端都可独立地发出或吸收无功功率。



图中，换流器2的功能是通过串联变压器给线路注入幅值和相角均可控的电压向量。通过调整注入电压的幅值、相位，能够实现电压调节、阻抗调节、相角调节等多种功能，可以对线路有功和无功潮流进行独立解耦控制。

换流器1的功能是通过公共直流母线提供或吸收换流器2进行潮流控制时与系统交换的有功功率，以维持直流母线电压恒定，保证换流器2正常工作，同时换流器1还能发出或吸收无功，发挥动态无功补偿功能。

从结构上看，UPFC是将静止同步串联补偿器（static synchronous series compensator, SSSC）作为串联电压源、静止同步补偿器（static synchronous compensator, STATCOM）作为并联电流源集成到一起而形成的潮流控制器，但其功能较SSCC、STATCOM更为强大。

其关键在于两者具有公共的直流母线，从而可以实现SSCC与STATCOM间的有功功率交换。UPFC中的SSCC可向系统注入任意幅值和相位的电压，从而实现了线路端电压控制、线路电抗控制、相角控制、自动潮流控制等功能。

工程应用：

目前，国外已投运三套UPFC装置，如下图所示：

序号	安装地点	电压（kV）	容量（MVA）
1	美国 Inez 地区	138	320
2	韩国 kangjin 地区	154	80
3	美国纽约 Marcy 地区	345	200

UPFC装置的成功投运，解决了当地电压支撑不足和输电线路过负荷等问题，为UPFC工程化提供了宝贵的工程运行经验。

上述UPFC工程的电压源换流器均采用门极可关断晶闸管（gate-turn-off thyristor, GTO）串联、低电平换流桥、变压器多重化拓扑构成，由于GTO阀驱动复杂、损耗大，同时变压器多重化结构复杂、成本高，从而导致换流器结构复杂、可靠性低且维护成本高。

随着电力电子器件的不断发展，使得采用新型器件（如绝缘栅双极晶体管，insulated-gate-bipolar transistor, IGBT）构建模块化多电平换流器（modular multilevel converter, MMC）成为可能。

与早期基于GTO器件的电压源换流器相比，基于MMC技术的电压源换流器具有显著的优势：

技术优点

- 1.MMC换流器的IGBT器件驱动功率小，损耗低。
- 2.MMC换流器无需耦合变压器和滤波器，结构简单，可靠性高，占地面积小，成本低且可维护性好。
- 3.MMC换流器由于其模块化特性，电压、容量等级易于扩展，便于大容量、高电压等级换流器的工程实现。

因此，国内在开展UPFC成套装置研发时选择采用MMC换流器。

2016年11月，世界上电压等级最高、容量最大的UPFC工程——江苏苏州南部电网500kV UPFC示范工程开工建设，标志着我国UPFC技术已较为成熟，具备推广应用的条件。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/104946.html>