



# 第一讲 风电场与电网的连接

---

## 1.1 含风电场的现代电力系统

## 1.2 电网结构及其特征

### 1.2.1 对电网结构的要求

### 1.2.2 各层次电网结构简介

## 1.3 风电场接入电力系统的方案

### 1.3.1 直接交流联网

### 1.3.2 常规高压直流（HVDC）联网

### 1.3.3 轻型高压直流（HVDC Light）联网方案

# 风能利用——从古到今



# 分布在山脊上的风力发电机



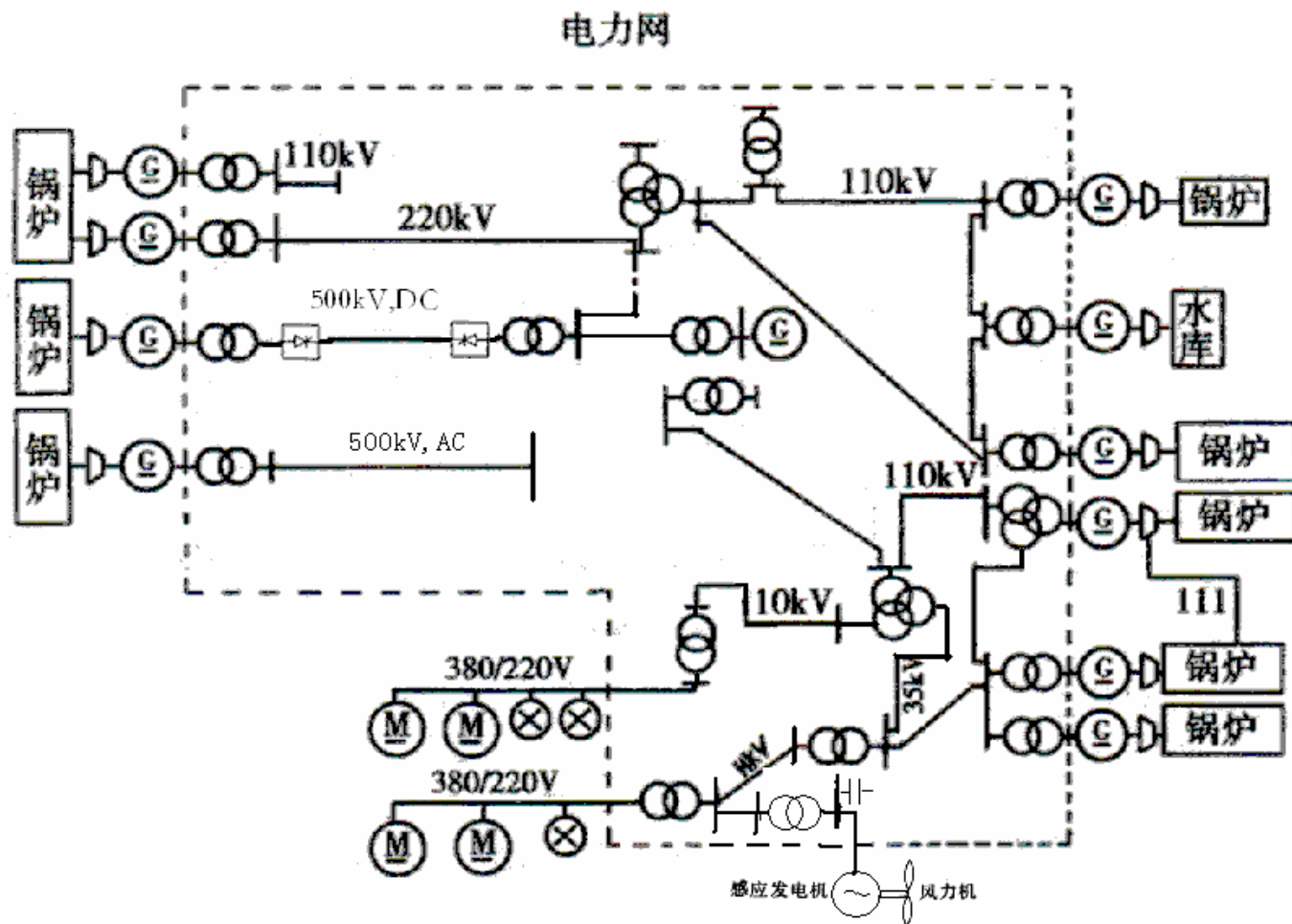
# 5000千瓦风力发电机投运了



- 2005-2-15中国电力网站
- 位于德国汉堡西北60公里处，德国REpower公司的5000千瓦风力发电机于2月3日投运。该风电机转子直径126米、控制盘高120米。REpower公司称5000千瓦风电机是为沿海风电场设计的，先在陆地上测试。据报道称，在这座风电机旁边是一座核电厂。图为德国REpower公司的5000千瓦风力发电机。（林西）

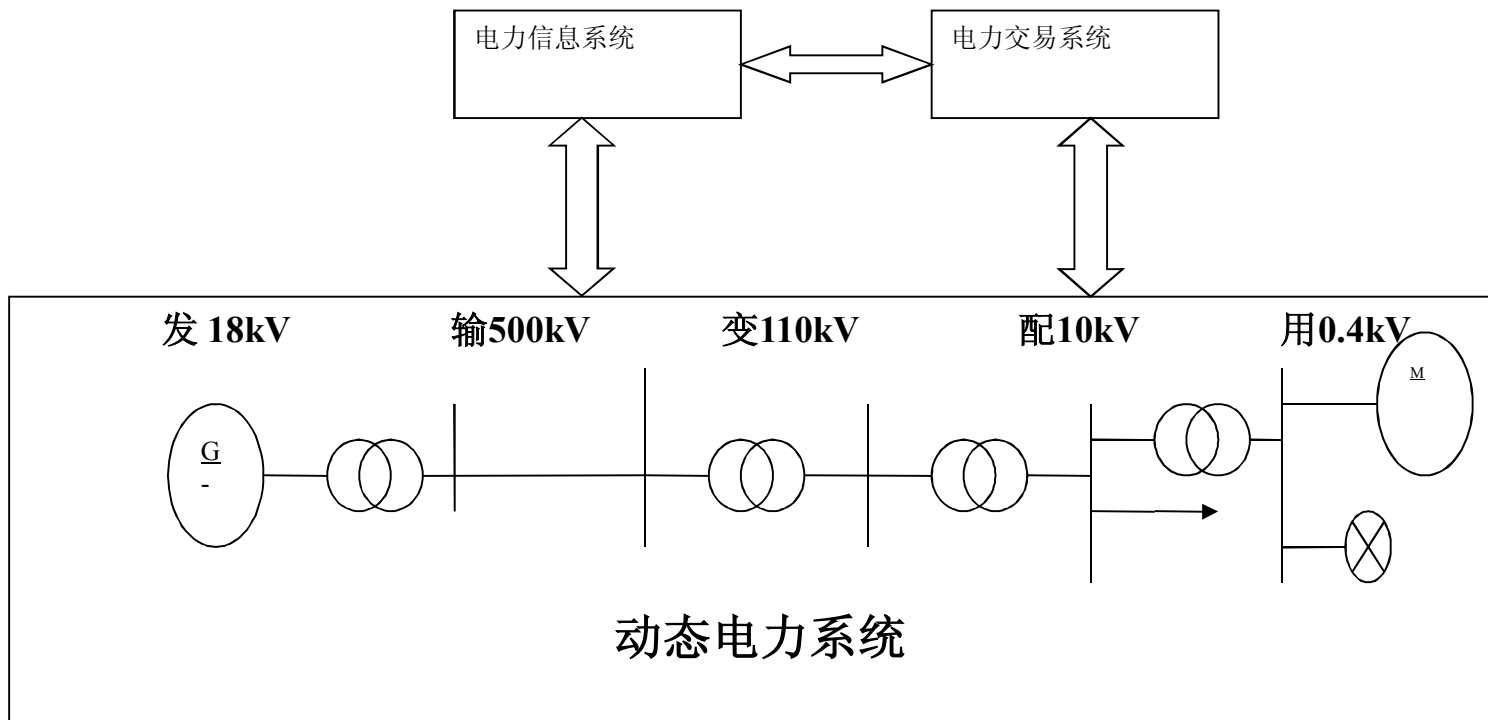
# 1.1 含风电的现代电力系统

发电厂与  
电力系统



# 电力系统组成

## ■ 电力系统基本组成部分





# 现代电力系统的三个基本系统

- **能量变换、传输、分配和使用的一次系统**，即发电、输电、变电、配电和用电，我们称之为**物流系统**。对于物流系统，我们侧重研究能量转化和变换、电能传输和分配以及电力系统可靠、稳定、安全、经济运行的规律；
- **保障电力系统可靠、稳定、安全和经济运行的监控、保护、自动控制、调度自动化等组成的能量管理系统**，我们称之为**信息流系统**。对信息流系统我们主要研究如何获得物流系统的各种状态的特征信息，研究这些信息的获取、传输、处理、和应用，这个系统主要有传感器、通信网络和计算机构成。
- **电能量的交易系统**，我们称之为**货币流系统**。对货币流系统我们主要研究电能这种特殊商品，如何通过市场进行交易，电能如何定价，在市场运营下如何保障电力系统可靠、稳定、安全和经济运行。





# 电力系统的特点

- 电能生产、传输和使用具有鲜明的**系统性**，这是由电能系统的本质决定的
- 迄今为止未能实现工业规模、大容量的**电能存储**，电能的生产与消费几乎在同一瞬间内完成，发电、输电、变电、配电、用户组成了始终处于连续工作和动态平衡的不可分割的整体；
- **电能供应系统和用户处于相互影响、相互制约之中**，电能供应系统要适应用户对电能需求的随机变化，向用户连续不断地提供质量合格、价格便宜的电能。用户（负荷）的特性和随机变化又反过来影响和冲击着电能供应系统；
- 电力系统在工农业生产，交通运输，商业和人民生活的各个方面起着**重要的作用**。每个现代国家的发展都与电能的利用水平密切相关。
- **电力系统安全是国家战略防御系统的一个组成部分**。它既能够创造巨大的物质财富和现代文明，也可能在瞬间造成重大的灾难，使现代社会陷入混乱。





# (1) 发电系统

- 发电是利用发电动力装置，将水的位能、石化燃料（煤、石油、天然气）的化学能、核能以及太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能等转化为电能的能量转化过程。
- **现代电能生产主要方式：**火力发电厂、水力发电厂和核电站。新的、环境友好的发电方式正在大力发展之中
- 从1873年法国佛泰因在维也纳国际博览会上用燃气发动机带动发电机，输电到1000m以外，供电动机驱动了一台水泵以来，发电技术有了极大的发展。
- **火电发展趋势：**火电厂规模和数量不断扩大，效率不断提高，火电机组继续向高参数、大容量发展，清洁煤发电技术受到高度重视。
- **水电发展的前景：**大型水电站继续增加，十分重视抽水蓄能电站建设。
- **核电稳步发展：**有核电国家增多；核电站数量增多；核电大致平稳发展，而核电比重有所下降
- **新发电方式、分布式发电兴起，**清洁、可再生能源发电日新月异。风力发电进入复兴时期，驶入“快车道”；太阳光发电和太阳热发电计划宏伟，“阳光屋顶计划”、“太阳能家庭供电系统”、“环保型住宅”层出不穷；高温燃料电池技术不断进步，应用在不断扩展。



## (2) 输电系统

电力传输经历了直流—交流—交直流系统的发展过程。

- **交流传输比直流输电具有一系列优点：**1)在交流系统中，电压变换容易，为不同电压等级的发电、输电和用电提供了灵活性；2)交流发电机比直流发电机简单得多；3)交流电动机比直流电动机简单且便宜得多。
- **交流输电系统有220kV的高压传输系统，而且有330~750kV超高压传输系统，世界上最高输电电压达到了1150kV。**
- **现代电力系统发展的一个趋势是邻近电力系统的互联。电网互联具有许多突出的优点：**
  - 有利于大范围的优化配置资源。在一次能源集中地建电厂，通过超高压、大电网、长距离输送到负荷中心，是开发这种能源的最有效的途径；
  - 可以安装大机组，大机组效率高，有利于节省投资，节约燃料，降低发电成本，加快电力建设速度；
  - 提高供电可靠性。各地区各类电源互为备用，增强了抗事故的能力；
  - 利用不同地区的时差，错开高峰负荷，减少了备用机组容量；
  - 利用水、火、核电之间的互补调节，实现水、火、核电的经济调度；
  - 能承受较大冲击负荷，改善电能质量。



## 输电系统(续)

- **高压交流运行的复杂性:** 调度复杂; 系统稳定(角度稳定、频率稳定和电压稳定)问题更突出; 事故损失巨大。 → **直流输电**
- **直流输电优点:** 没有角度稳定问题, 线路造价低, 线路上没有感抗和容抗, 没有无功损耗, 电晕损耗和无线电干扰小, 调节快速, 运行可靠等。特别适合于长距离、大功率传输和连接两个大系统或频率不同的两个电网。
- **现代电力系统结构日益复杂:**
  - 1) 出现了长距离重负荷的输电网络, 增加了维持系统正常运行电压的难度, 系统元件的故障或检修在弱联系的电网中往往会发生系统输送功率的大面积转移, 造成潮流的极不合理分布和受端网络功率的更大缺额, 结果使网架很弱而输送功率又很大的超高压系统较一般高压系统不仅容易发生静态角度不稳定, 而且更容易发生电压不稳定的破坏。
  - 2) 发电机的单机容量逐渐增大, 功率因数越来越高, 使得同步发电机标么电抗增大, 惯性时间常数减小以及无功出力的相对降低(发电机额定功率因数高), 这些都对系统稳定造成不利的影响。
  - 3) 超高压直流输电其容量在系统中所占的比例越来越大, 相对的交流系统变得较弱, 与超高压直流输电相连的弱交流系统电压稳定性问题。



## (3) 供电与配电系统

- 在我国供电网（或称高压配电网）电压为35 kV、66 kV、110 kV，配电网电压是10 kV及其以下电网。发电系统生产的电能经高压传输到用电中心时，要降到用户用电器合用的电压水平。这是通过供、配电网来实现的。风电场一般连接于供配电系统。
- 对于配电系统，要求有高的供电可靠性；合格的电能质量，在电压水平、电压波形的突变与闪变、谐波含量等电能质量指标方面满足规程要求；为用户提供优质服务，从“电老虎”变成“电保姆”，保障人民生活，促进经济发展。
- 相对于输电系统，配电系统具有以下特点：
  - ①配电系统具有环形网络，为了故障定位和继电保护整定方便，通常处于开环运行状态；
  - ②配电系统的支路电阻  $r$  和电抗  $x$  之比  $r/x$  一般比较大，其并联电导和容纳很小。
  - ③配电系统常处于不平衡多相运行状态，负荷和网络结构皆不平衡：各相负荷大小不等，可能单相或两相运行。
  - ④配电系统装置（如分段器，重合器，电容器）沿配电馈线分布，常装设在杆塔顶上；
  - ⑤配电数据库比相关的输电数据库常常大出一个数量级，可能包括成千上万个数据点。
  - ⑥配电系统因建设和维修而频繁变化。
  - ⑦发生事故多。
  - ⑧配电系统中，许多现场设备都是手工操作的，而输电系统中大多是遥控的。



## 1.2 电网结构及其特征

---

- 1.2.1 对电网结构的要求
- 1.2.2 各层次电网结构简介



## 1.2.1对电网结构的要求

- 适应社会发展的需要；保证良好的电能质量；安全、可靠、稳定运行；提高电网运行的经济性；必须实行统一调度，分级管理。
- **电网的可靠性评价**主要包括两个方面：充裕性和安全性。充裕性表示电网内有足够的发、输、配电设施，能对用户提供足够的电力，是一个反映静态的指标。安全性则表示电网发生扰动时的承受能力，是一个反映动态的指标。
- 可靠性，安全、稳定的运行要求**电网结构合理，满足下列要求：**
  - 1)能适应发展变化和各种运行方式下潮流的变化，并具有一定的灵活性。
  - 2)任一元件无故障断开，应能保持电网稳定运行，且不会使其它元件超过事故过负荷的规定
  - 3)应有较大的抗扰动能力。
  - 4)实现分层和分区的原则。可以使一个层次的故障或事故不影响或少影响其他层次



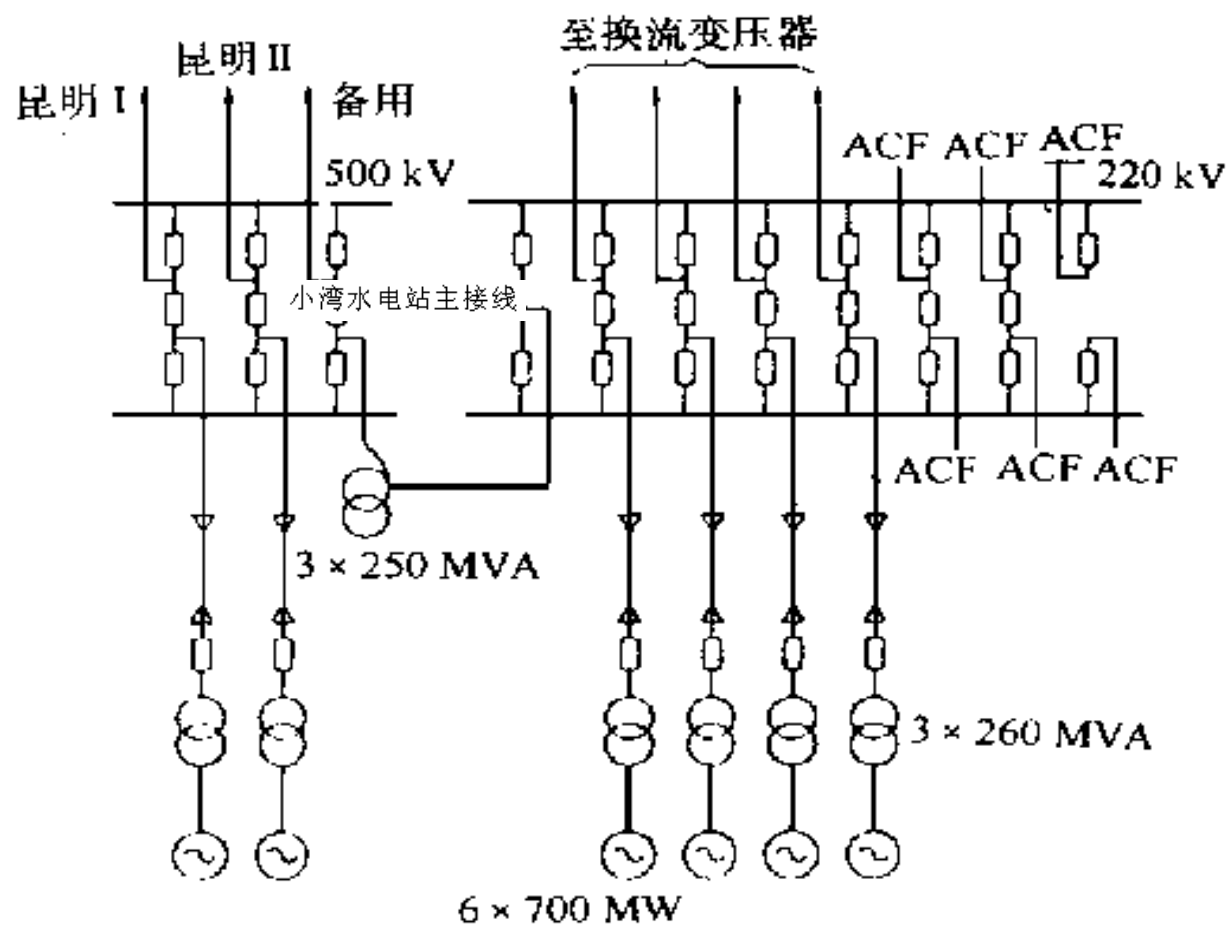
# 1. 2. 2各层次电网结构简介

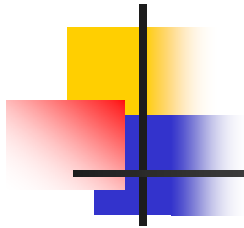
- (1) 发电厂电气系统
- 图1-2 和1-3 是发电厂电气系统构成，也就是发电厂电气主接线图，它是表示了发电厂、变电所的主要电气设备元件（发电机、变压器、断路器、隔离开关、互感器、母线等）相互连接关系的图形。其任务是汇集发电机发出的电能，可靠地分配、输送出去。
- 电气主接线表示了主要电气设备的连接顺序，表示了发、供、用的关系，是配电装置布置、各种运行方式改变、继电保护和自动控制方式确定以及电气设备选择等的依据，是系统性能（可靠性、经济性、灵活性等）优劣的基础。可以说，主接线一定，发电厂和变电所的电气系统大局就定了。
- 对电气主接线的基本要求，概括地说应包括可靠性、灵活性和经济性三个方面。在电能传输上要解决两个方面的问题：
  - 1) 纵的方面，解决发电厂（变电所）如何经变压器（升降电压）和系统相连的问题，即**变压器的设置问题**；
  - 2) 横的方面，解决电源、馈线各回路之间如何联系，电能如何汇集和分配，即**母线制问题**。



# 云南小湾水电站

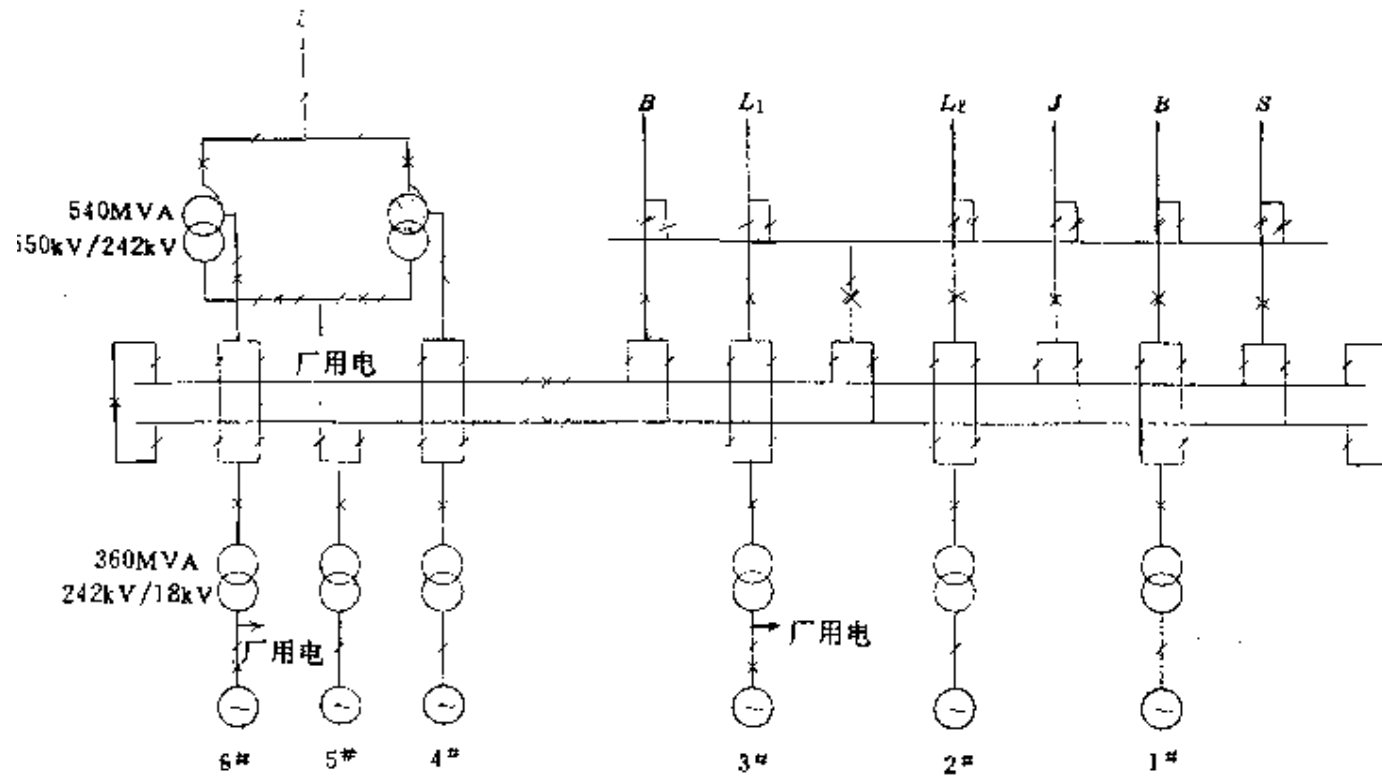
- 水电厂



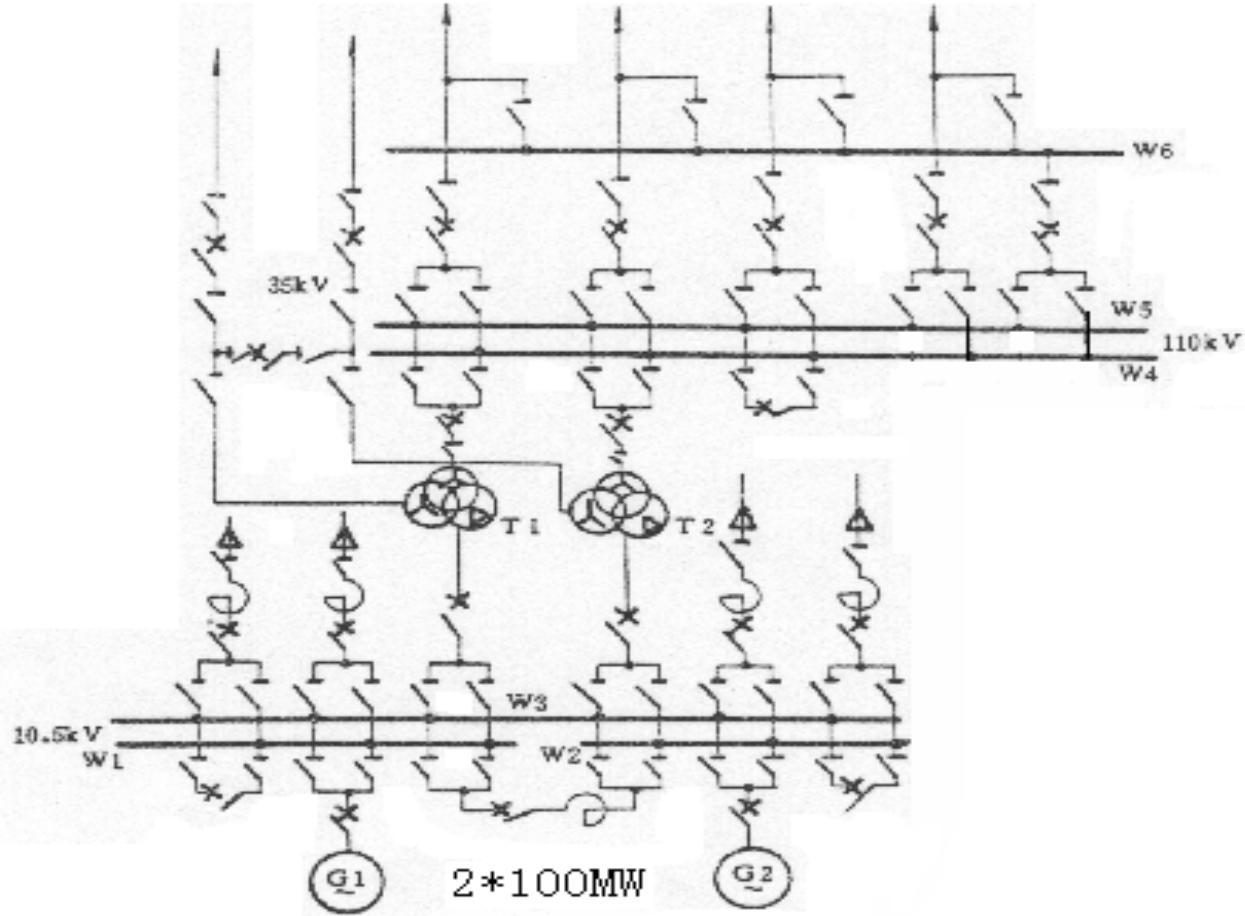


# 小浪底水电站

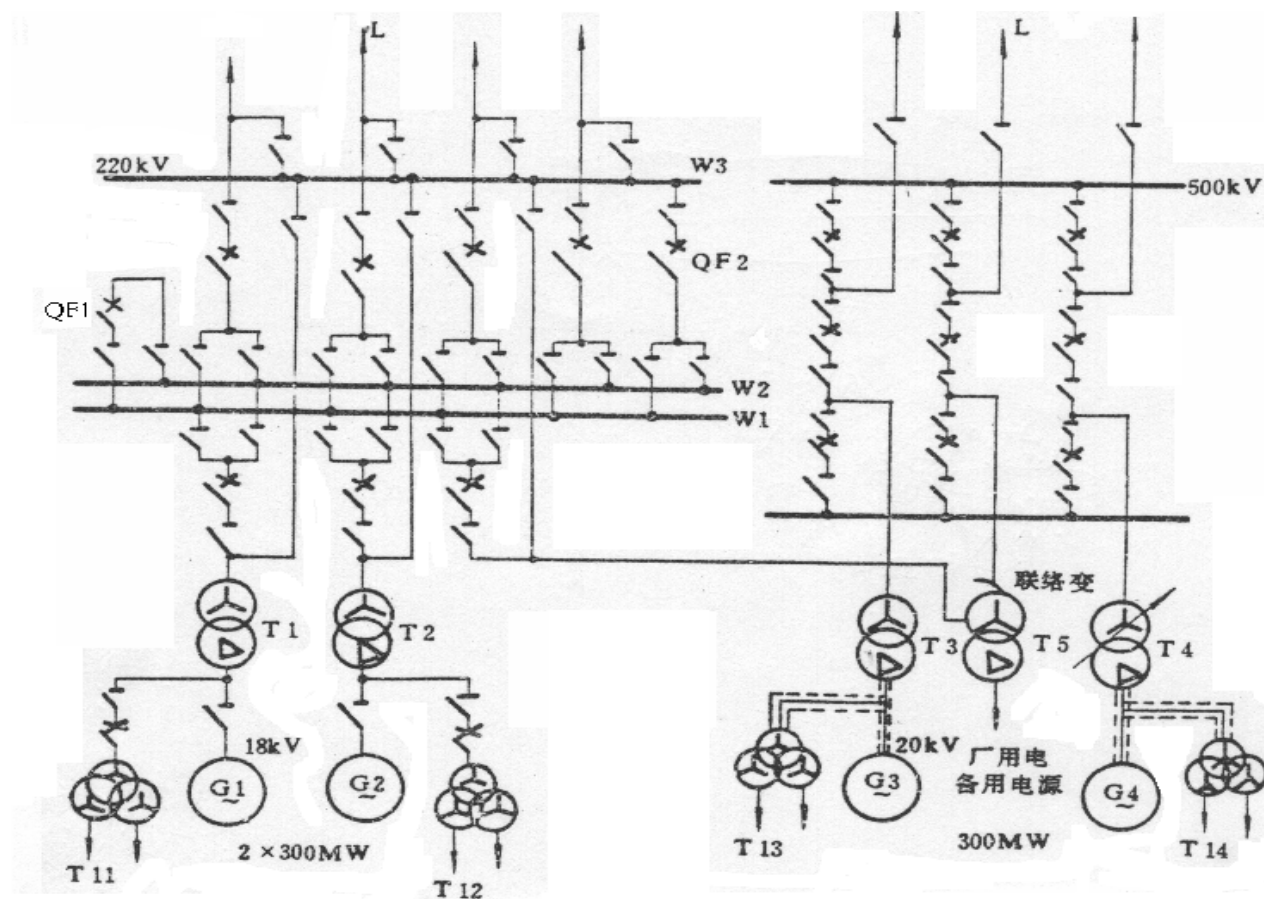
水电站



# 热电厂电气系统

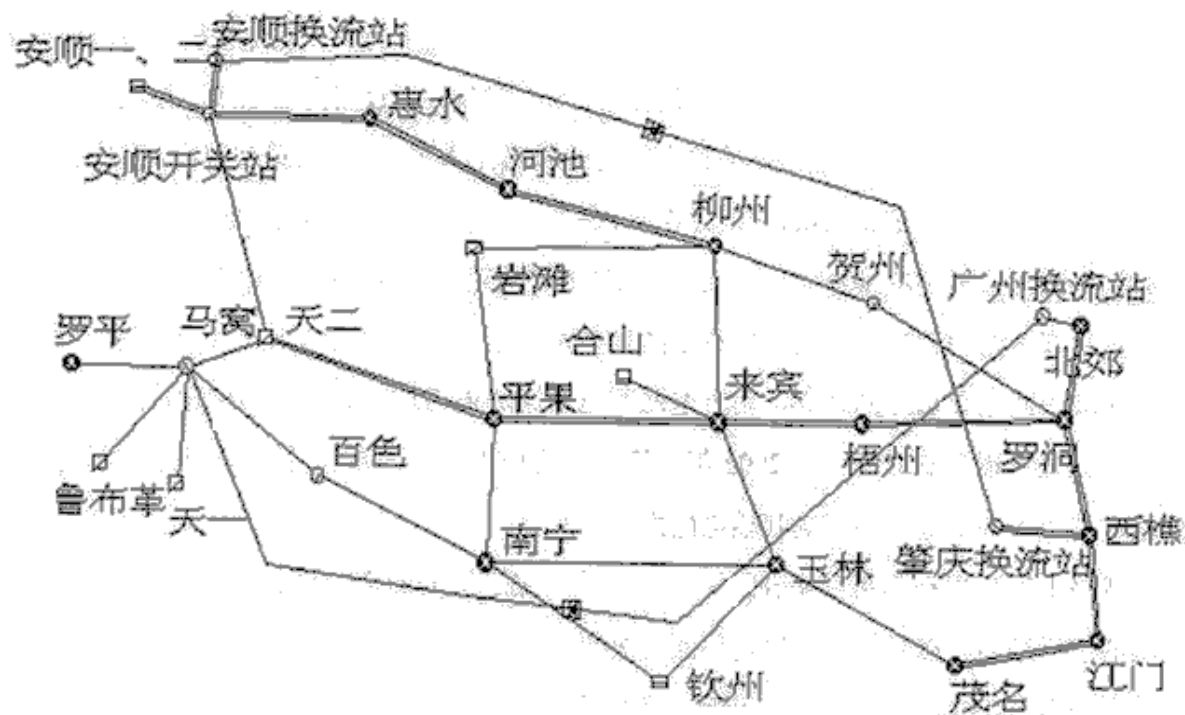


# 凝汽式发电厂主接线

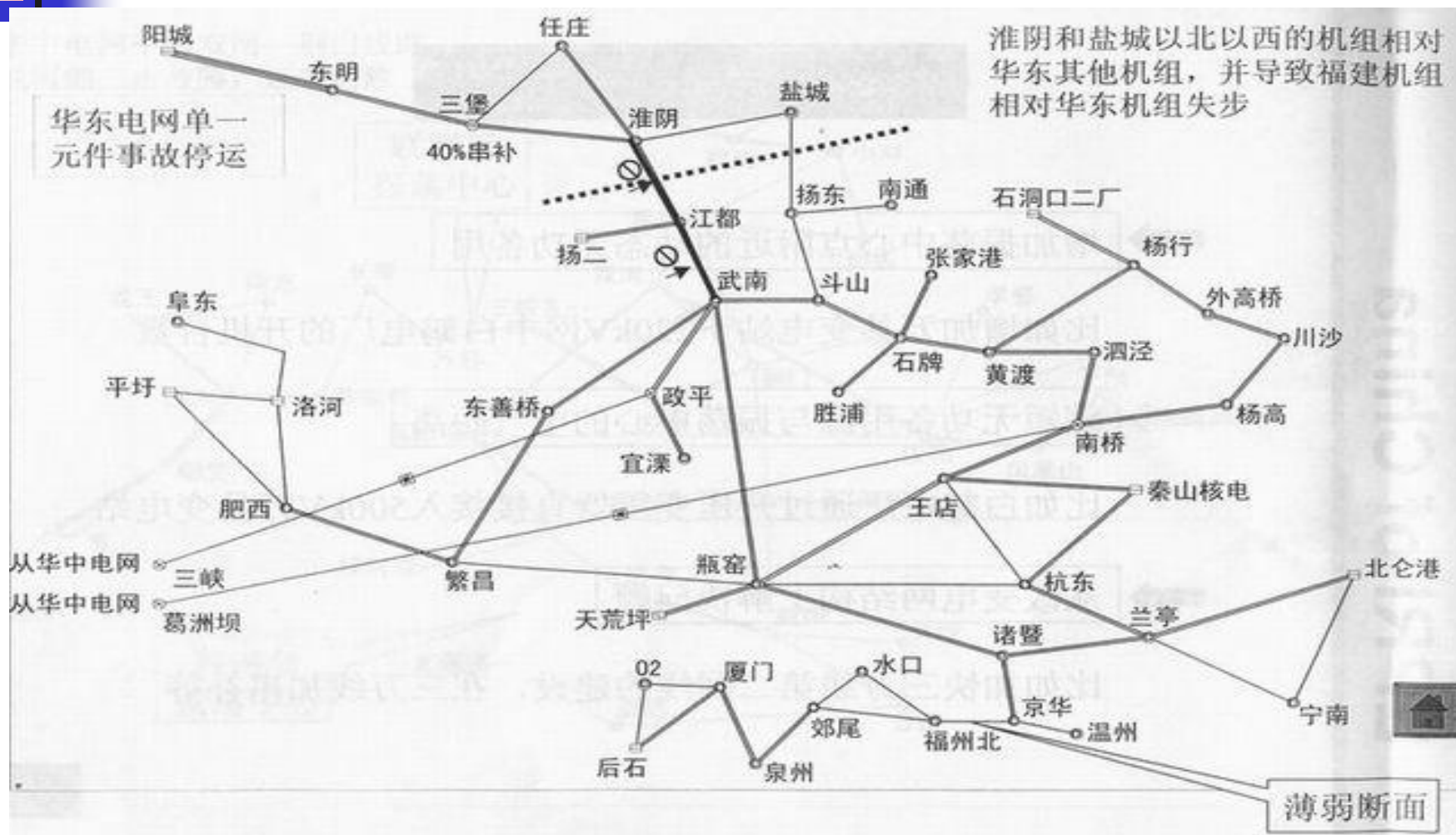


## (2) 输电系统

- 图 1-4 是输电系统略图。输电系统的任务是把发电厂的电能远距离送到负荷中心。要求稳定、可靠、经济地传输大量的电力。



# 华东(输电)电网





# 额定电压等级与输送距离/输送功率

- 我国国家标准《额定电压》（GB156-80）中规定的电力系统额定电压等级为：220伏、380伏、3千伏、6千伏、10千伏、35千伏、63千伏、110千伏、220千伏、330千伏、500千伏、750千伏(待定)。与各额定电压等级相适应的输送距离和输送功率。
- 并行输电；交直流混合输电；网络结构；“田字”形结构
- 与各额定电压等级相适应的输送距离和输送功率

线间电压(千伏)	输送功率(兆瓦)	输送距离(公里)
10	0.2~2.0	6~20
35	2.0~15.0	20~50
110	10.0~50.0	50~150
220	100.0~500	100~300
330	200~800	200~600
500	1000~1500	150~850
765	2000~2500	500以上



### (3) 供、配电系统

图1-6是供、配电系统图。

——配电网是将电能从高压变电所直接分配到用户去的电力网。

——配电网分为高压、中压和低压配电网。在中国高压配电网（供电网）电压一般为**35**千伏、**63**千伏和**110**千伏；中压配电网电压一般为**6~10**千伏以及**20**千伏；低压配电网电压一般为三相四线制的**380**伏/**220**伏。

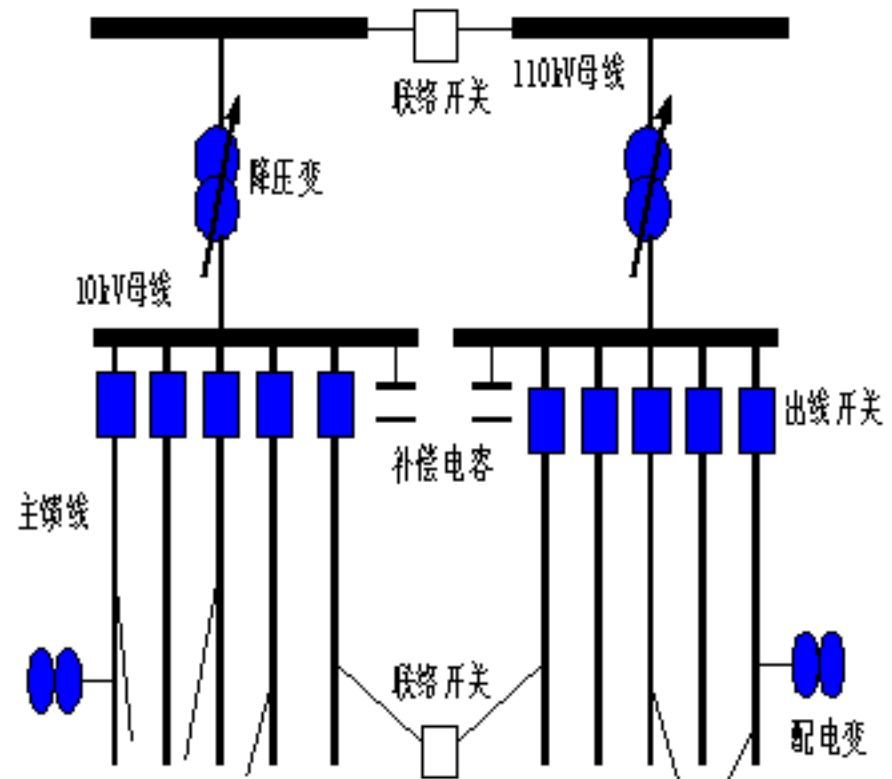
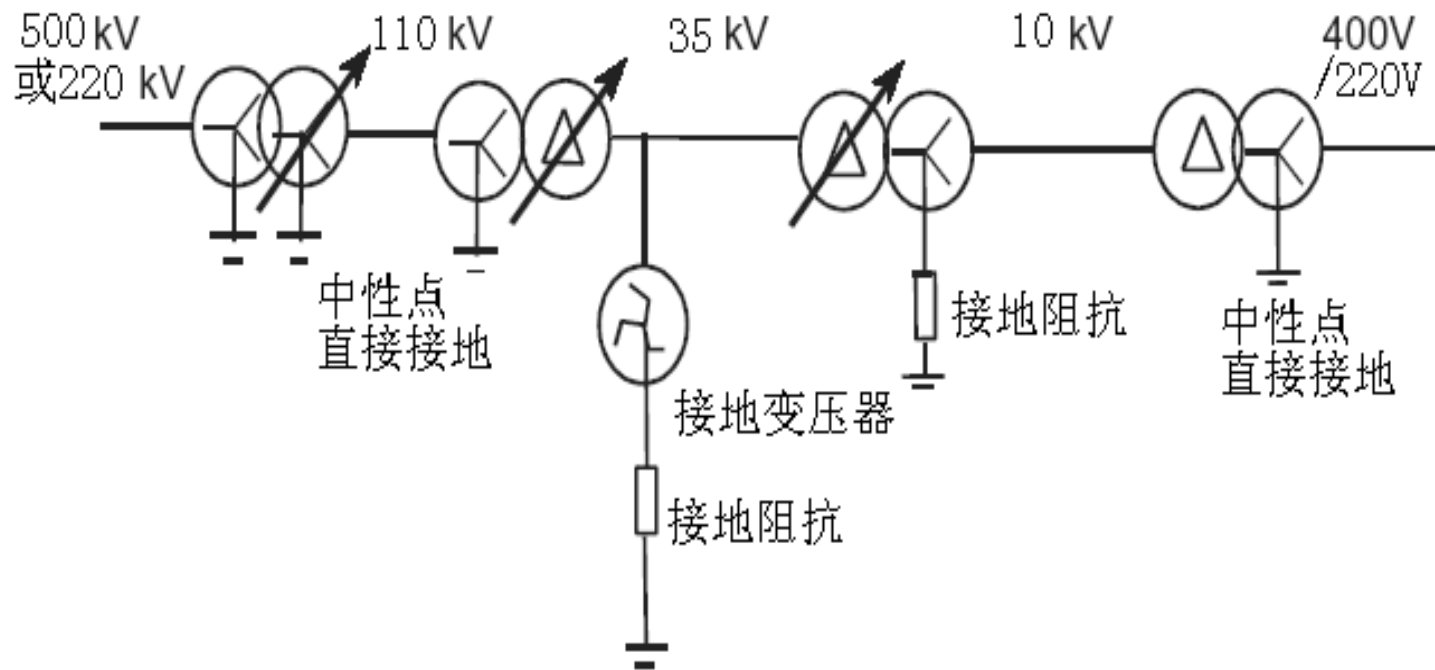


图1-6 一个单变电站的配电系统单线图

# 典型的配电网电压等级和接地配置





## 环网建设，开环运行，备用电源自投

---

- 供电网采用环网建设，开环运行，备用电源自投的运行方式。
- 好处：
  - 使电气主接线比较简洁；
  - 相对投资较少；
  - 运行方式安排较灵活；
  - 在一般事故情况下，可保证连续供电，不会造成变电站母线失压
- 问题：
  - 在继电保护及自动装置的设置和相互配合上，难度增大。
  - 一旦保护或自动装置不能有效切除故障设备，则事故可能扩大，导致局部系统失去稳定，甚至与主网解列。

# 10 k V 配电网

## ■ 10 k V 配电网

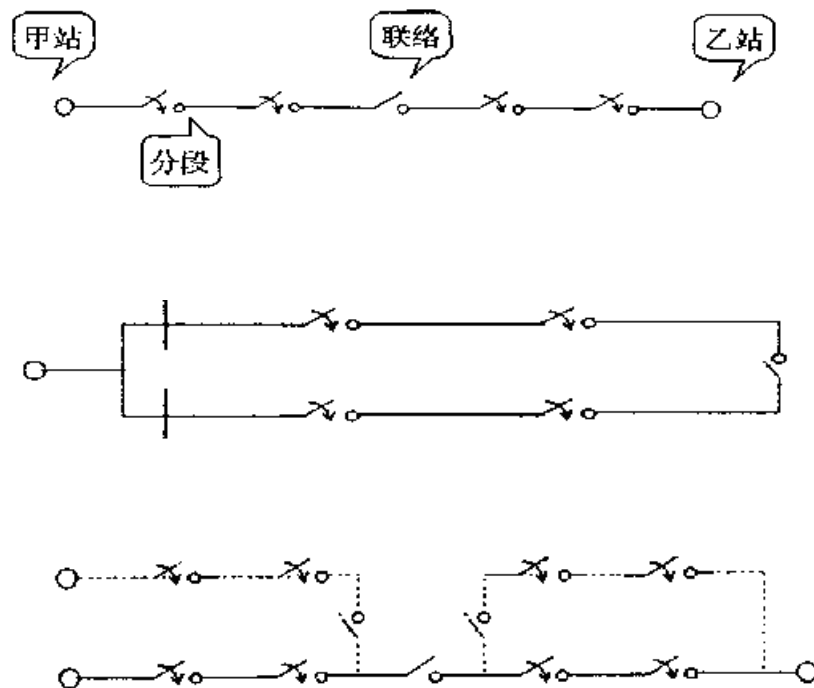
——除重要用户为双电源供电外，一般采用单电源供电；

——接线简单，投资少，见效快，正常情况下，能保证对用户的供电；

——一旦线路要检修或出现问题，无论是首端,还是末端整个线路均会停电，这就大大降低了供电的可靠性；

——10 k V 线路上加装分段开关及在相邻10 k V 线路上加装联络开关，提高供电可靠性；

——环网接线，网络式接线，正常时开环运行。任何情况下，至少有一个电源向用户供电。





# 配电系统的发展中的两个问题

## (1) 大城市高负荷密度供电问题

- 大城市的负荷密度有明显的增大，北京城内地区已达 $10\text{MW}/\text{km}^2$ ，上海闹市区已达 $25\text{MW}/\text{km}^2$ 。日本东京银座一带，高达 $148\text{MW}/\text{km}^2$ (只有 $0.8\text{km}^2$ )，上海估计最高密集地区可能达到 $150\text{MW}/\text{km}^2$
- 预计到2015年时，一般城市按 $25\text{MW}/\text{km}^2$ ，大城市闹市区按 $50\sim 60\text{MW}/\text{km}^2$ 考虑
- 怎么办？
- 由 $220\text{kV}$ 降至 $10\text{kV}$ ，将来负荷密度进一步升高时，可能出现变电站 $10\text{kV}$ 出线过多的问题。
- $10\text{kV}$ 改为 $20\text{kV}$ 配电，但全国多年来已形成 $35\text{kV}$ 、 $10\text{kV}$ 电力系统，多加一个电压等级将会使系统更复杂，管理更困难，不如对密集地区直接用 $35\text{kV}$ 配电。
- $220\text{kV}$ 降至 $35\text{kV}$ 配电可以满足需要。



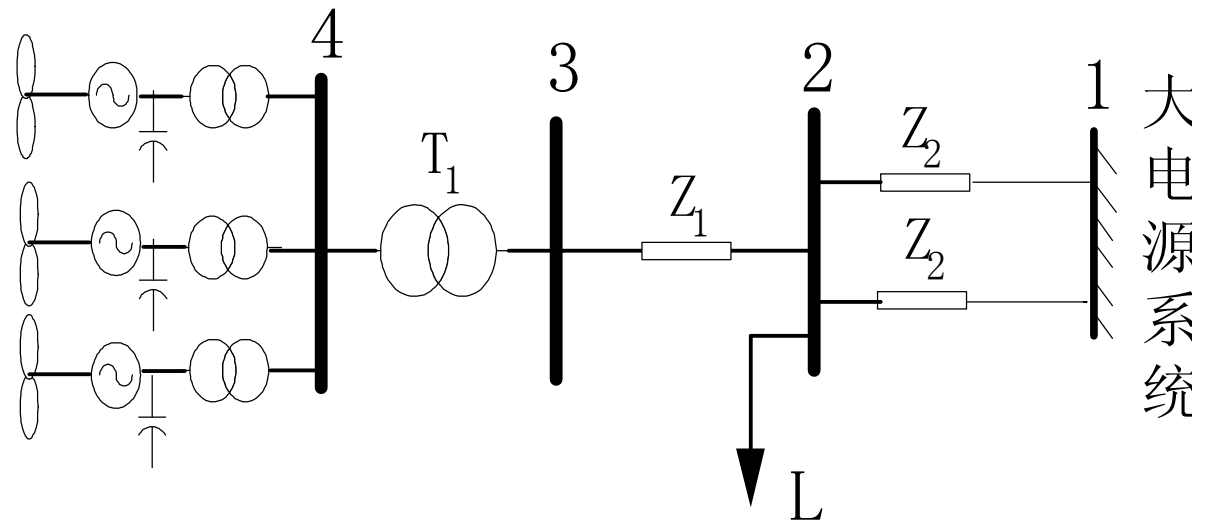
## 配电系统的发展中的两个问题（续）

### （2）电器设备现代化问题。

- **保证供电电压质量。**装设电容器和电抗器，分别在用户处，在低压(10kV、380V、220V)配电线上，  
在降压变电站的高压侧装设足够的静止电容器和电抗器，  
装设按电压自动调整的装置。  
带负荷调整的变压器，可以在一些需要的地方采用，并不需要普遍采用。
- **减少谐波。**对高次谐波的用户及变电站设备进行检测和治理，不让其进入输配电系统，影响其他用户的供电波形。
- **供电设备的现代化。**设备小型化、密封化，保证可以长期不修或少修，SF6开关、GIS、真空开关，室内变电站采用干式变压器、SF6变压器，在室外采用密闭的低压配电箱，在变电站采用户外的静电电容器，在继电保护方面采用微机保护等等，
- **二次变电站集中控制。**它要求提高设备自动化、遥控化程度，并需要建立相应的信息系统

# 1. 3 风电场接入电力系统的方案

- **1.3.1** 直接交流联网
- **1.3.2** 常规高压直流联网
- **1.3.3** 轻型直流输电联网





# 1. 3. 1 直接交流联网

1) 风电接入配电馈线，

T接；

2) 风电接入配电变电站

—功率流向

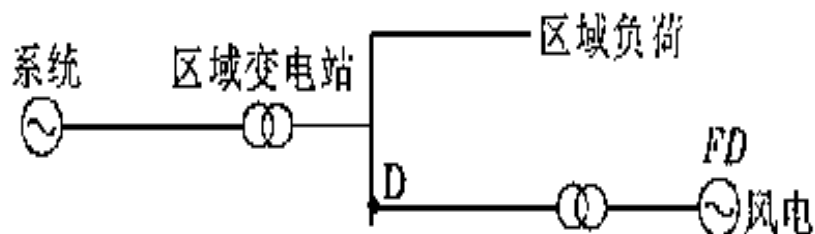
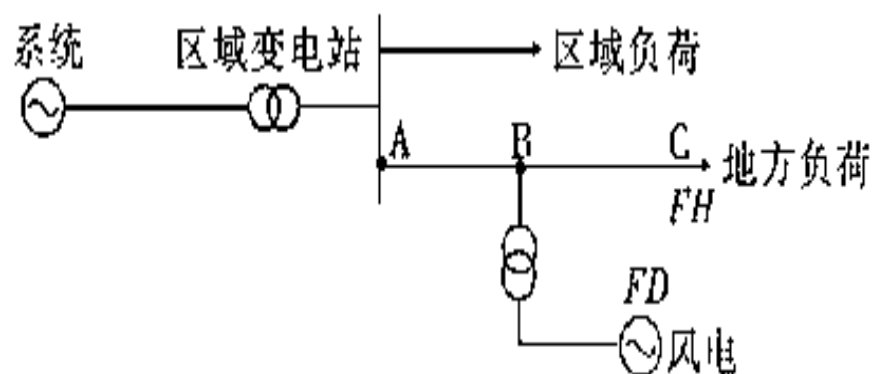
—功率大小

—地方负荷

—输电线尺寸

—保护配置

—投资



## 接入哪个电压等级？

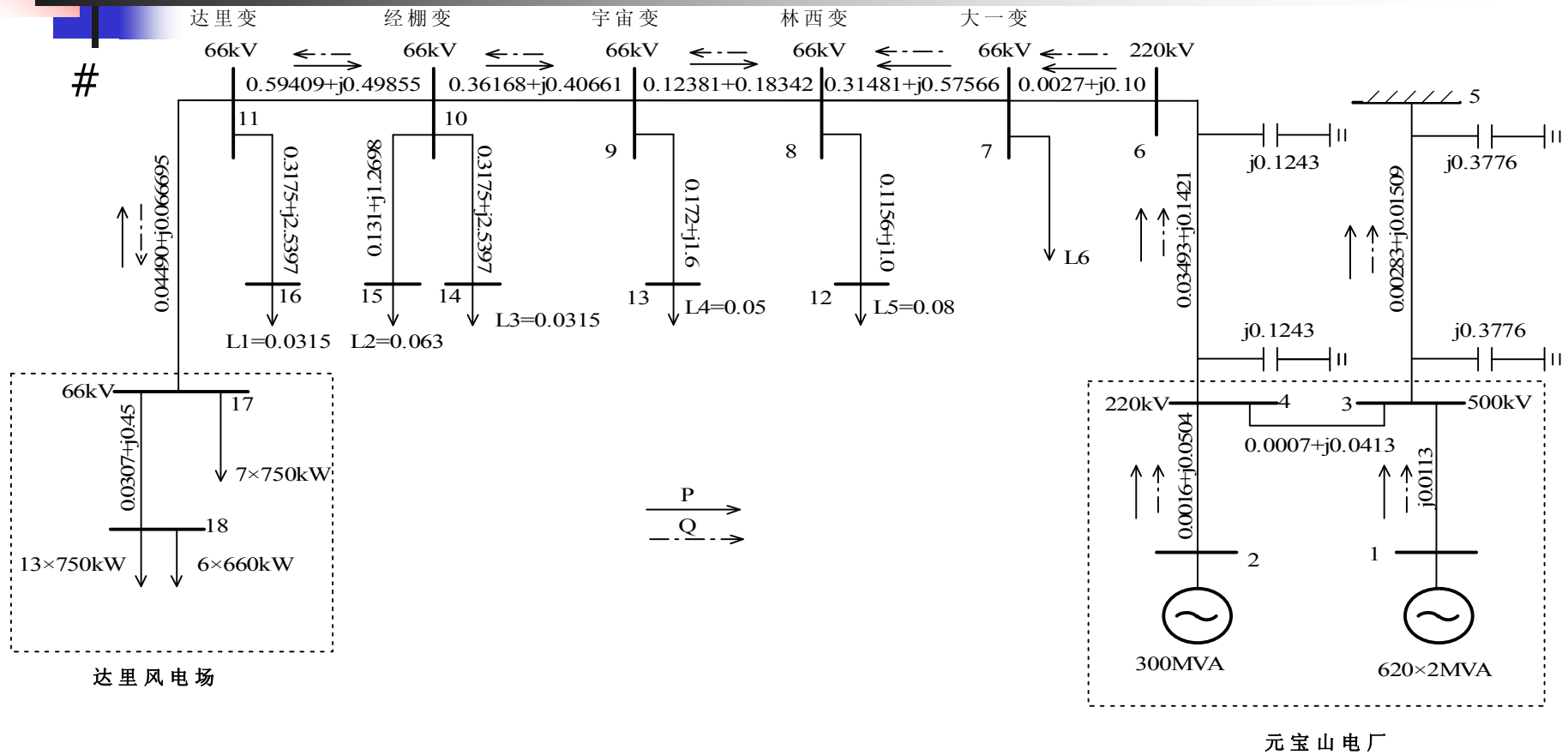
表10-4 风电场可能接入容量（英国）

连接位置	风电场最大容量 (MW)
11 kV 网络	1-2
11 kV 母线	8-10
33 kV 网络	12-15
33 kV 母线	25-30
132 kV 网络	30-60

## 法国

LV	LV (1 F)	(230V)	$P \leq 18 \text{ KVA}$
	LV (3 F)	(400 V)	$P \leq 250 \text{ KVA}$
MV	$1 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$	(15kV, 20 kV)	<b><math>P \leq 12 \text{ MW}</math></b>
HV	$50 \text{ kV} < U \leq 130 \text{ kV}$	(63 kV, 90 kV)	$P \leq 50 \text{ MW}$
	$130 \text{ kV} < U \leq 350 \text{ kV}$	(150 kV, 225 kV)	$P \leq 250 \text{ MW}$
	$350 \text{ kV} < U \leq 500 \text{ kV}$	(400 kV)	$P > 250 \text{ MW}$

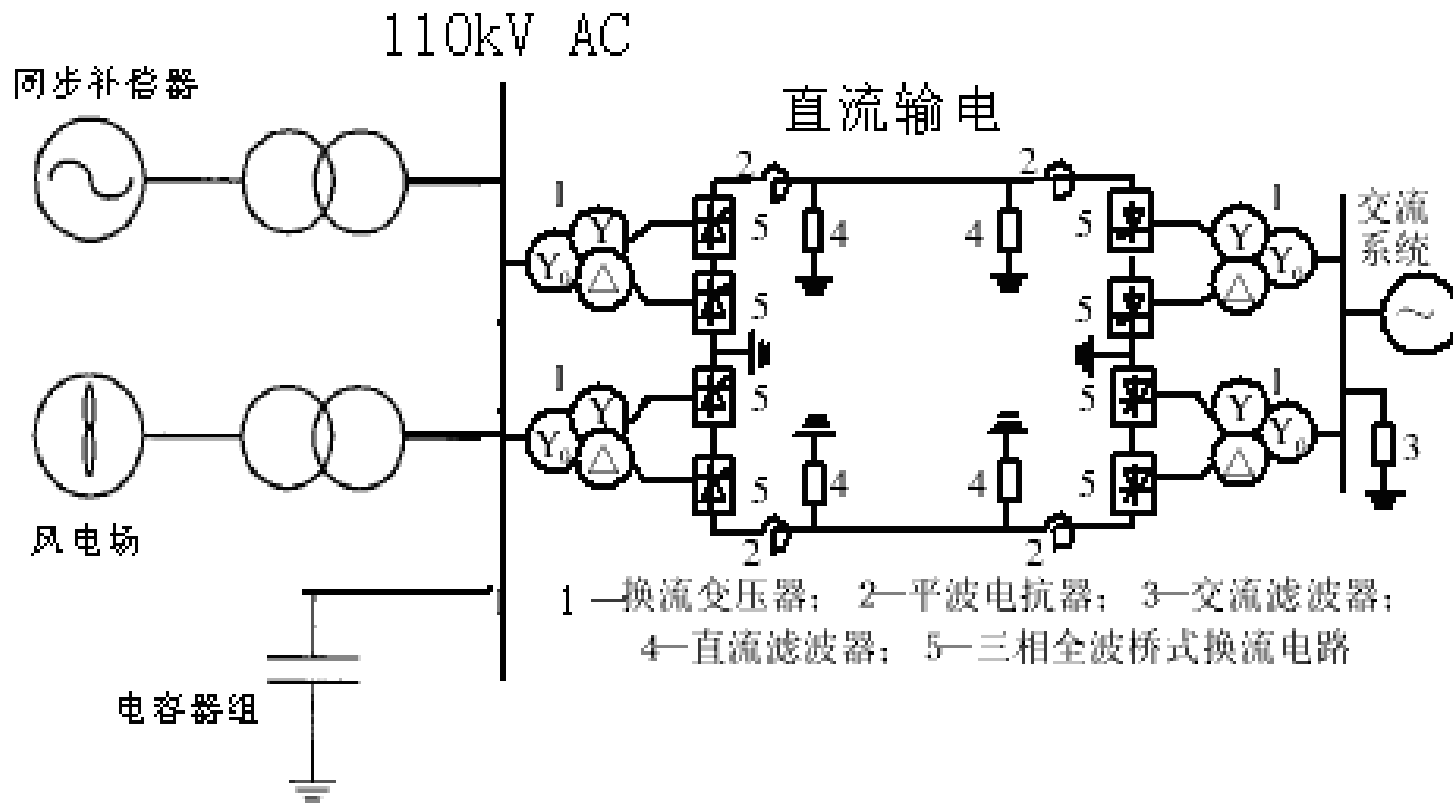
# 达里风电场



$S_B=100\text{MVA}$

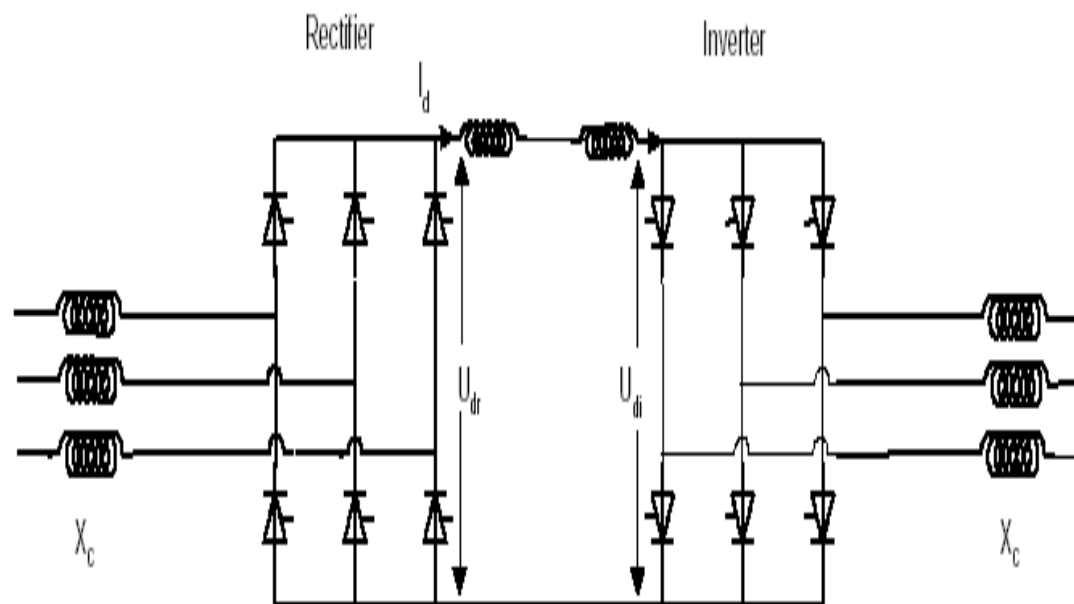
额定电压	额定容量	功率因数	$x_d$	$x_d'$	$x_d''$	$x_2$	$x_0$	$x_q$	$x_q''$	$T_{do}'$	$T_{do}''$	$T_{q0}''$	M
15.00kV	300MVA	0.85	0.4950	0.0730	0.0540	0.0570	0.0300			7.40			
20.00kV	600MVA	0.900	0.3050	0.0467	0.0320	0.0340	0.0136						

# 1. 3. 2 常规高压直流联网方案



## 传统HVDC结构特点

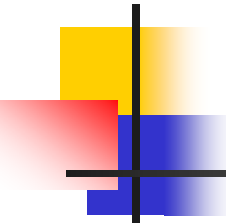
- 换流桥开关元件为晶闸管
- 换流桥自然换相
- 有换流变压器
- 有交流滤波器和直流滤波器
- 有直流侧平波电抗
- 有交流侧无功补偿





# 传统高压直流联网优点

- **送电端频率是可变的**——各发电机之间解耦而且不需要与公共电网同步是一个主要的优势，相连接各端都可根据自己的控制策略运行，基本上没有相互影响。
- **传输距离不再是技术极限**——电缆充电电流对交流电缆连接影响很大，对直流系统的影响可忽略
- **风电场与主电网的干扰相隔离**——任何一端的故障对另一端的影响的很小
- **潮流是完全确定的和可控的**——无论是正常还是故障条件下，为了适应电网的运行情况，输电线的潮流可以通过一定的控制策略进行控制，这一点与交流连接不同。
- **装置可靠性高**——传统的HVDC在世界各地都有很好的运行经验
- **功率损耗低**——直流系统没有电缆的充电电流的影响，降低了损耗，也就是说相同容量的直流联接系统要比交流联接系统的运行损耗要小得多。
- **每根电缆的功率传输能力高**——一组高压直流输电线的传输能力是相同规格三相交流输电线的1.7倍。
- 直流输电线路在陆上通常采用架空线，在海上则采用电缆。
- 常规的高压直流输电可以传输功率大，大型风电场可以考虑采用。

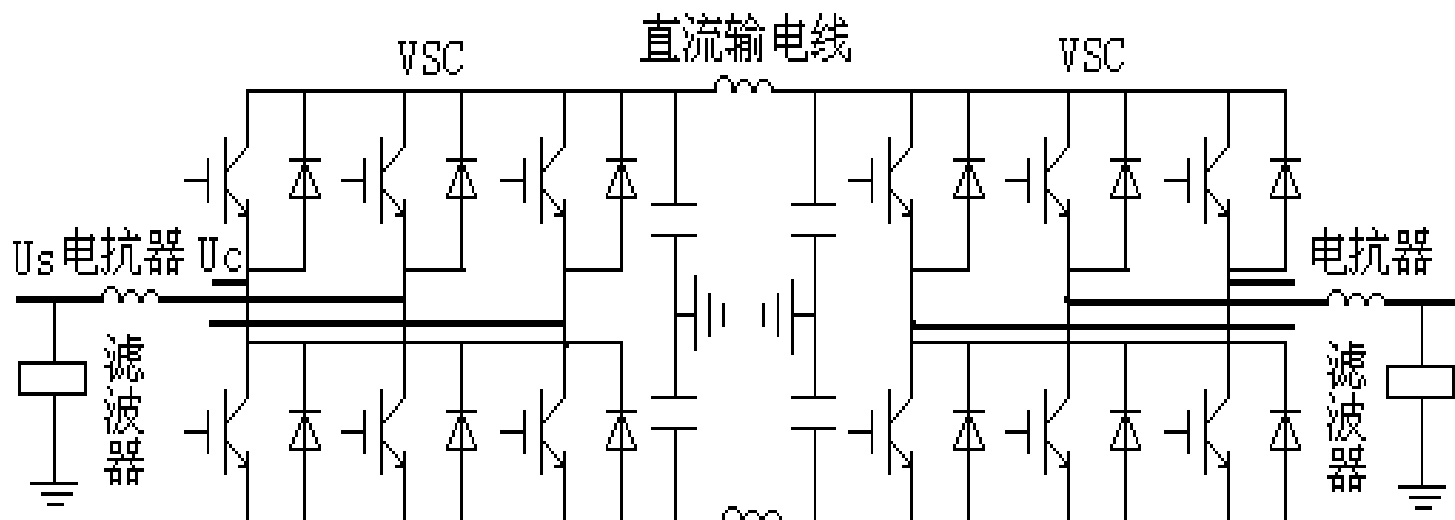


传统HVDC采用晶闸管和移相换流（PCC）技术，应用领域局限在220kV及以上电压等级的远距离大容量输电、海底电缆输电及不同额定频率或相同额定频率交流系统间的非同步互联等

■ **HVDC主要缺点：**

- (1) 晶闸管为半控型器件，需要交流电网提供换相电流，这个电流实际上是相间短路电流，因此要保证换相可靠，受端交流系统必须具有足够的短路容量，当受端网络比较弱时便容易发生换相失败。因此不能向小容量交流系统以及不含旋转电机的负荷区供电。
- (2) 晶闸管换流器只能工作在二、三象限，要吸收较多的无功功率。正常稳态运行时，整流器和逆变器分别吸收占所输送直流功率30%~50%和40%~60%的无功功率，暂态运行时换流器吸收的无功功率更多。
- (3) 晶闸管开关频率低，换相损耗大；
- (4) 换流器产生的谐波次数低、容量大，加重了滤波的负担。
- (5) 滤波和无功补偿使换流站投资大、占地面积大，无功补偿装置和滤波设备的投资约占换流站总投资的15%，占地面积约为全站总面积的三分之一。

# 1. 3. 2 轻型高压直流联网方案



HVDC Light结构特点换流桥开关器件为IGBT

- 换流桥强迫换相，VSC+PWM
- 有交流变压器（或还有串联电抗）
- 有直流电容
- 有小型交流滤波器





# 对HVDC Light结构的理解

---

- **IGBT:** 具有自关断能力，额定电压和额定电流随工艺发展也逐渐提高，开关频率高，控制功率小
- **VSC:** 直流电容的存在，和开关管IGBT的选用，使得电压源型换流成为可能，换流桥交流侧电压的相位、幅值、频率可控，实现有功、无功的四象限控制
- **PWM:** 不仅可以减少输出谐波，而且可以在不改变直流侧有源器件状态的条件下实现输出波形的幅值和相位的可控
- **交流变压器和串联电抗:** 交流变压器的主要目的是匹配电压水平，其漏抗也可作为VSC结构交流侧所需的串联电抗。串联电抗的目的是隔离两个电压源，作为换流桥和系统交换功率的连接（interface）



## 对HVDC Light结构的理解(续)

---

- **直流电容**：支持无源VSC型逆变所需的稳定直流电压，滤除直流线路上的谐波，避免直流线路和相邻其它交流线路产生电磁耦合
- **交流滤波器**：由于PWM的采用，交流侧谐波较小，用较小的滤波器即可达到谐波要求



## (1) HVDC Light 工作原理

### 工作原理

$$P = \frac{U_s U_c}{X_1} \sin \delta$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X_1}$$

式中

$U_c$ —换流器输出电压的基波分量

$U_s$ —交流母线电压基波分量

$\delta$ — $U_c$ 和 $U_s$ 之间的相角差

$X_1$ —换流电抗器的电抗

①当 $\delta > 0$ 时， $P > 0$ 。这时VSC作逆变运行，向电网输送有功；

②当 $\delta < 0$ 时， $P < 0$ 。这时VSC作整流运行，从电网吸收有功；

无功功率的传输主要取决于 $(U_s - U_c \cos \delta)$ ：

③当 $(U_s - U_c \cos \delta) > 0$ 时， $Q > 0$ ，这时VSC发出无功，向电网输送无功；

④当 $(U_s - U_c \cos \delta) < 0$ 时， $Q < 0$ ，这时VSC吸收无功，即吸收电网的无功。



# HVDC Light控制方式

---

- 稳定运行状态：一侧为定直流电压控制，一侧为定直流电流控制，两侧独立控制各自的无功潮流
- 特点：控制两侧换流桥的换流比和触发角，即可达到控制目的，站与站间不需要通信
- 无功控制状态：在扰动发生两侧系统均需要无功支撑的情况下，HVDC Light可解列等效成两个STATCOM运行
- 四象限控制状态：当一侧系统扰动需要有功无功调节时，HVDC Light在该侧可相当于带有充足储能的STATCOM运行
- 其他控制：HVDC Light相对HVDC在控制潮流上有更多的灵活性，可实现HVDC的控制方式



## (2) 常规HVDC与HVDC Light的区别

- **功率范围。**传统的HVDC主要运行于大的功率范围，大约在250MW以上，而HVDC Light输送的功率可以从几MW到300MW，直流电压可达到±150kV。
- **模型组件。**HVDC Light以一套有若干标准规格换流站的模块为基础，大多数设备在制造厂家就被封装起来，而传统的HVDC是根据系统运行的需要以及某些特殊的用途而设计装置
- **换流电路。**HVDC Light的换流电路是自然双极性，直流电流没有接地，因此需要两根导线，而传统HVDC直流电流接地，可以用单根电缆。
- **换流站电路结构。**HVDC Light换流站通过电压源换流器(VSC)控制着IGBT二极管的通断,因此电路结构与传统的HVDC有着很大的不同。
- **运行的独立性。**HVDC Light不依赖于交流系统去维持电压和频率的稳定。与传统HVDC相比短路电流容量并不重要。HVDC Light可以给无源网络供电，传统的HVDC在受端电网中必须有旋转电机。
- **对功率的控制。**传统的HVDC通过对触发角的控制来达到对功率的控制。HVDC Light可以在很短的时间内形成任意的相角或振幅，独立地控制有功和无功。



# HVDC Light优点

- VSC电流能够自关断，可以工作在无源逆变方式，不需要外加换相电压。克服了传统的HVDC系统受端必须是有源网络的根本缺陷，为远距离的孤立负荷送电成为可能。
- VSC可以四象限运行，正常运行时可以同时且相互独立的控制有功、无功。控制器可根据交流系统的需要实现自动调节，所以两侧VSC换流器不需要通信联络
- VSC不仅不需要交流侧提供无功功率，即可以动态补偿交流侧的无功功率，稳定交流母线电压。如果VSC容量允许，那么HVDC Light系统可以向故障系统提供有功功率的紧急支援也可以提供无功功率的紧急支援，从而提高系统的功角和电压稳定性
- VSC交流侧电流可以被控制，所以不会增加系统的短路容量，这意味着加入HVDC Light后，交流系统的保护整定基本不需改变。
- 比传统的HVDC有更好的隔离作用。



## HVDC Light优点总结（续）

---

- 可控制线路有功传输，并可独立控制两侧的无功；紧急状态可提供有功、无功支持，有利于系统功角、电压稳定性
- 改变电流方向来实现传输功率翻转，便于实现并联多端直流输电系统
- 采用PWM，谐波少，交流测滤波装置容量减小
- 不依赖交流系统维持频率、电压稳定性，对接入系统短路比关系不大，可将弱交流系统接入
- 采用直流电缆输电，增加输电容量，降低输电成本，有利于生态环境
- 可将不同频率设备接入系统
- 电路简单，可以采用模块化设计
- 占地面积小，运行维护简单



# 轻型直流输电对风电场的适应性

- (1) **灵活性**，能够很容易的通过增加新的单元元件来扩大容量，而风力发电场通常会在几年之后扩大，或者通过连接临近地点的新风场来扩大。
- (2) 风力发电场一般在比较偏远的地方，电网比较薄弱，风电场规模受短路比所限制（短路比10附近），而采用HVDC Light技术进行输电连接后，**短路比不再是一个限制条件**
- (3) 能够独立地给吸收无功功率的风力发电机提供它所需要的无功功率，从而能够**满足风力发电机励磁的要求**。
- (4) 具有**独立控制有功和无功能力的特点**，风力发电不稳定工况不会影响电网的电能质量水平。特别是VSC技术允许风机变速运行，使它们运行在能输出最大功率的转速下，这种变速运行可提高风力发电**3%~10%**的输出功率，所以具有明显的经济效益。

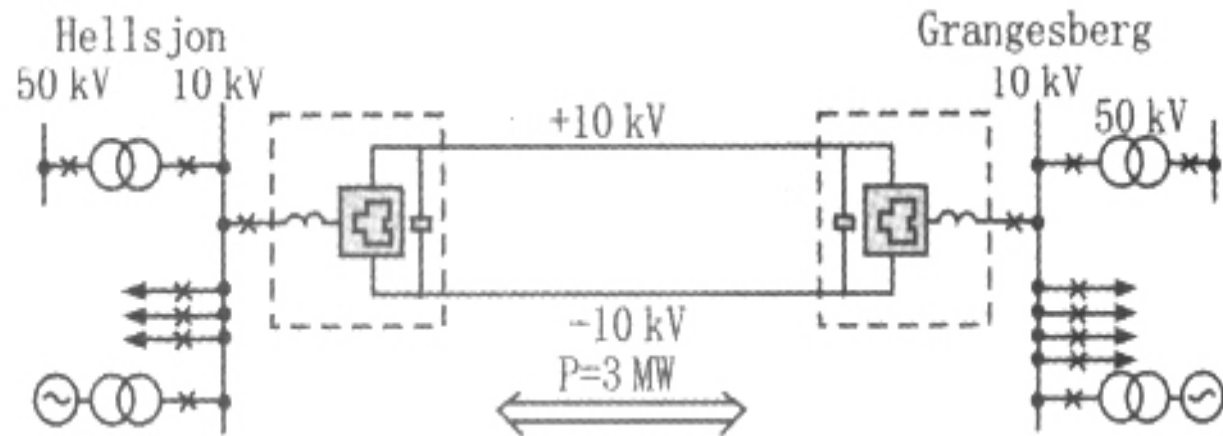


### (3) HVDC Light 输电在风力发电场中的应用

已投入运行的 HVDC Light 工程主要技术指标

	投入运行时间	最大传输功率 /MW	两侧交流电压 /kV	直流电压 /kV	直流电流 /A	线路长度 /km	选择 HVDC Light 的主要原因
赫尔斯扬项目	1997.3	3	10	±10	150	10	试验
Gotland 工程	1999.6	50	80	±80	350	2×70	解决风力发电带来的弊端以及用地下电缆更容易得到有关部门的允许
Eagle Pass 工程	2000.9	36	132	±15.9	1 100	背靠背	增加双方的交易量提高电压的可控性
Directlink 工程	2000	180(3×60)	132/110	+/-80	342	6×159	增强系统间的联系以便更好的交易，用地下电缆更容易得到有关部门的批准
Tjaereborg 工程	2000.8	8MV·A/7.2	10.5	±9	358	2×4.3	解决风力发电所带来的弊端

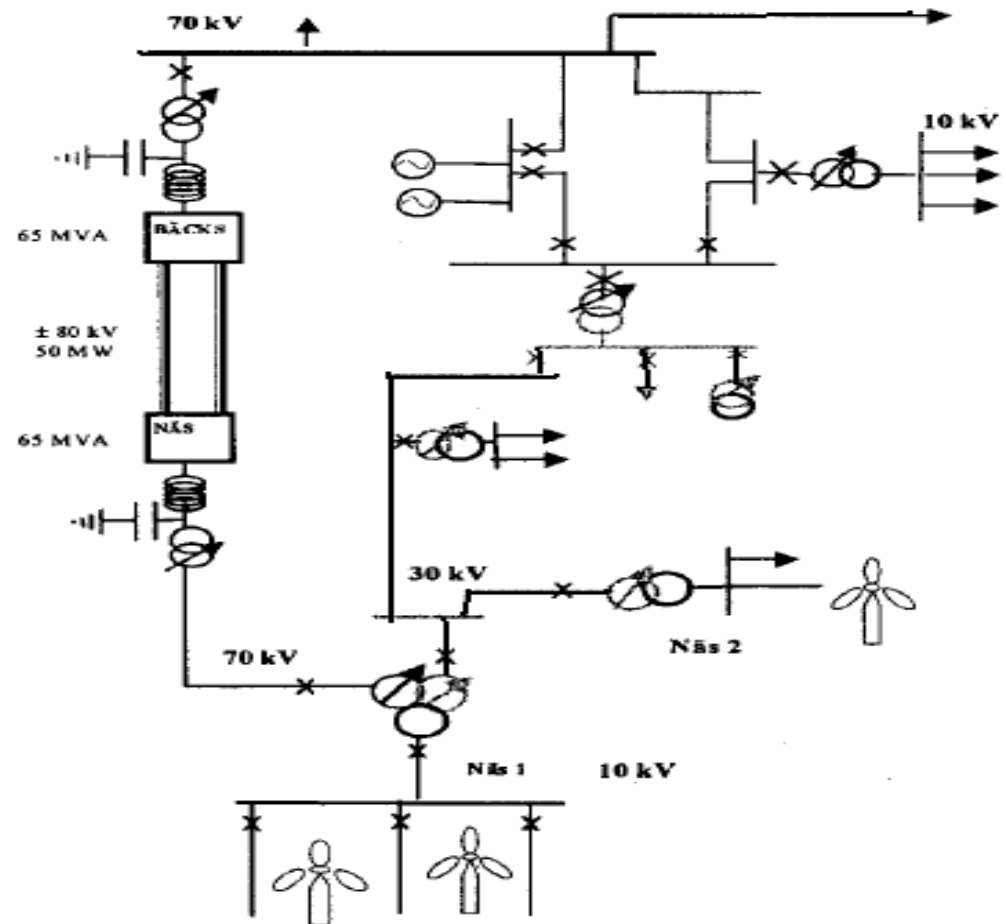
# 赫尔斯扬(Hellsjon)工程



- 1997年瑞典的赫尔斯扬(Hellsjon)工程试验成功。连接10kV交流电网中的不同部分。该工程采用瑞典中部Hellsjon与格兰斯堡之间一条长10km的50kV交流输电线路。已经完成了复杂的试验计划，输电稳定，换流器能够满足关于噪声水平、谐波畸变、电话干扰和电磁场等方面的技术要求。

# 瑞典哥特兰岛轻型HVDC工程

- 1999年6月，瑞典哥特兰岛 (Gotland) 轻型HVDC工程投入运行。这是世界上第1个商业化运行的轻型HVDC系统。哥特兰岛在波罗的海，位于瑞典本土大陆以东大约90 km处。从20世纪90年代开始，风力发电的总装机容量已达到40MW。风力发电的快速发展已经影响到哥特兰岛的电力网络，需要增加传输容量，选用轻型HVDC方案，使用2条DC电缆





## Direclink工程—HVDC Light

---

- Direclink工程—HVDC Light 用于电网间的电能交换，
- 2000年在澳大利亚修建的HVDC Light传输系统首次将澳大利亚的新南威尔士(New South Wales)电网和昆士兰州(Queensland)电网联接起来，并在两个电网之间进行电能交易。

Direclink工程的HVDC Light系统由三条长59km的传输线组成，每条最大传输功率60MW，电压80kV。



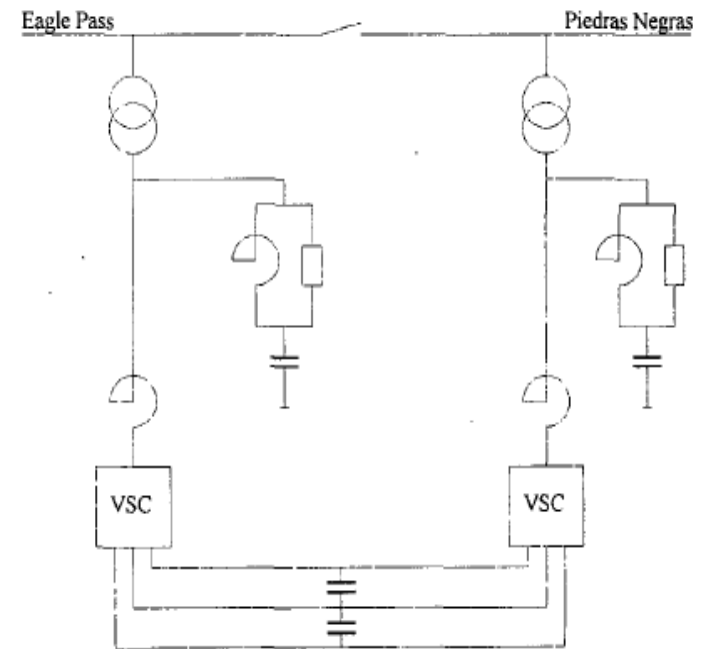
# Jiaerborg工程—HVDC Light

---

- Jiaerborg工程—HVDC Light 用于风力发电
- 丹麦能源部门修建了5个利用海风发电的风力发电厂，每个电厂的装机容量大约为**150MW**。预计在今后的**30**年内逐步增加容量大约为**4000MW**风力发电设备，约占总装机容量的**40%~50%**。
- 风力发电电能的不稳定性会影响整个电网电能的质量，同时也会引起电压控制和无功补偿的问题。为了解决风力发电存在的这些问题，由**ELTRA**公司设计并建造了**Jiaerborg**工程，使用**HVDC Light**进行输电。

# 伊格帕斯 (Eagle Pass) HVDC Light工程

- 伊格帕斯 (Eagle Pass) HVDC Light工程伊格帕斯原先由两条138kV的交流输电线供电，由于负荷的不断增长致使其在用电高峰时期出现大幅度的电压波动，在紧急情况下该电网虽然可以从墨西哥电网得到紧急功率支援，但电压往往会高于138kV。
- 2000年9月，由EPRI、AEP和ABB 联合在伊格帕斯修建了一条HVDC Light线路。这条线路增加了向伊格帕斯输电能力，同时也解决了美国与墨西哥之间在电能交换方面所受到的容量限制的问题。这条线路可以传输36MW 的有功功率，两端所需的全部无功补偿为+36Mvar。





# 建设中的HVDC Light

正在建设的 HVDC Light 工程的主要技术指标

	投入运行时间	最大传输功率 /MW	两侧交流电压 /kV	直流电压 /kV	直流电流 /A	线路长度 /km	选择 HVDC Light 的主要原因
New Haven 工程	2002.5	330	345/138	±150	1175	2×40	用海底电缆以及增加电力市场的竞争力
Murraylink 工程	2002.4	200	132/220	±150	1400	2×180	两个异步电网连接以便进行电力交易，更容易得到有关部门的许可



*End*

---

谢谢各位!

