



清华大学
Tsinghua University

《电力系统运行与管理基础》

第一讲 课程概论





主要内容

- 开设本门课程的目的
- 本课程的主要讲授内容
- 主要讲授范畴与教学目标
- 课程讲授方式
- 电力系统定义与基本特征
- 电力系统的形成和发展



你听到过下面那些和电力系统有关的概念

A

智能电网

E

能源互联网

B

新能源电力系统

F

微电网

C

“双高” 电力系统

G

综合能源系统

D

电力电子化

H

新一代电力系统

提交



你对上面的概念是否感到过迷茫?

A 是

B 否

提交



开设本门课程的目的

■ 电力系统的变与不变

- 结构的变化
- 组成元件的变化
- 性质是否变化
- 基本要求是否变化

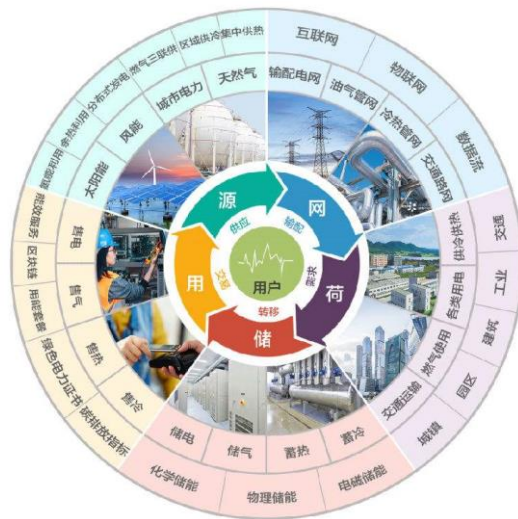
掌握本质才能更好地应对变化!



开设本门课程的目的

■ 不了解行业，看不清未来

- 电力行业
 - 是否是日薄西山？
- 智能电网
 - 电力行业的回光返照？
- 能源互联网
 - 噱头还是出路？





开设本门课程的目的

■ 老师的担心：同学的系统性思维有待提高

- 每门基础课都很优秀但缺乏融会贯通
- 掌握基础课知识但缺乏和电力系统相关联
- 具备电力系统局部知识但缺乏整体认识





开设本门课程的目的

■ 瞎子摸象表现之一

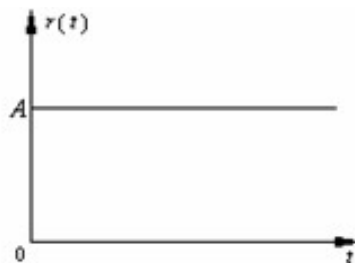
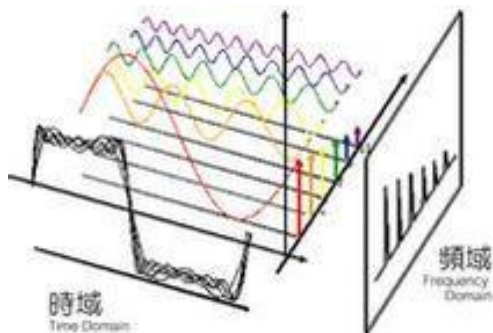
- 每门基础课都很优秀但缺乏融会贯通

- 《信号与系统》

- 与通信、信息及自动控制等专业有关的一门基础课

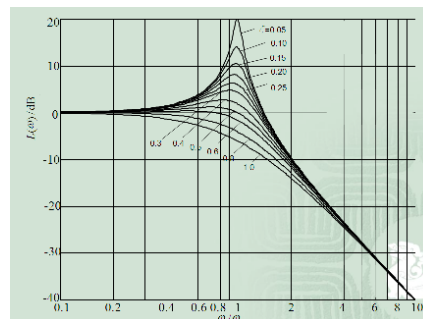
- 在“时间域”及“频率域”下研究

- 时间函数 $x(t)$ 及离散序列 $x(n)$ 的各种表示方式；
 - 系统特性的各种描述方式；
 - 激励信号通过系统时所获得的响应。



阶跃信号

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$
$$G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\zeta\omega_n(j\omega) + \omega_n^2}$$
$$|G(j\omega)| = \frac{\omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}}$$
$$\varphi(\omega) = -\tan^{-1} \frac{2\zeta\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$$





开设本门课程的目的

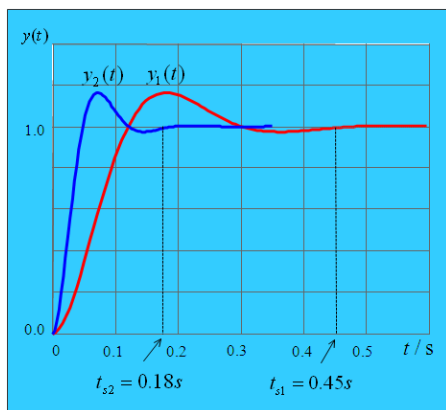
■ 瞎子摸象表现之一

- 每门基础课都很优秀但缺乏融会贯通

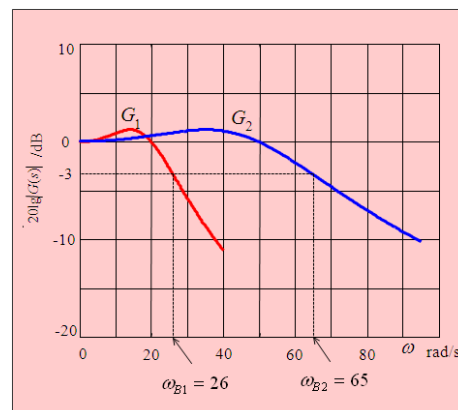
- 《自动控制原理》

- 在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。

- 频域分析和综合方法是经典控制理论的重要方法。



提高动态响应时间



提升系统的高频响应特性



开设本门课程的目的

■ 瞎子摸象表现之一

- 每门基础课都很优秀但缺乏融会贯通

- 《线性代数》

- Cayley Hamilton 定理。

For a $n \times n$ square matrix A , it must satisfy its own characteristic equation.

$$\text{If: } |\lambda I - A| = \lambda^n + a_n \lambda^{n-1} + \cdots + a_2 \lambda + a_1 = 0$$

$$\text{Then: } A^n + a_n A^{n-1} + \cdots + a_2 A + a_1 I = 0$$

- 《自动控制原理》

- 系统可控性证明。



开设本门课程的目的

■ 瞎子摸象表现之二

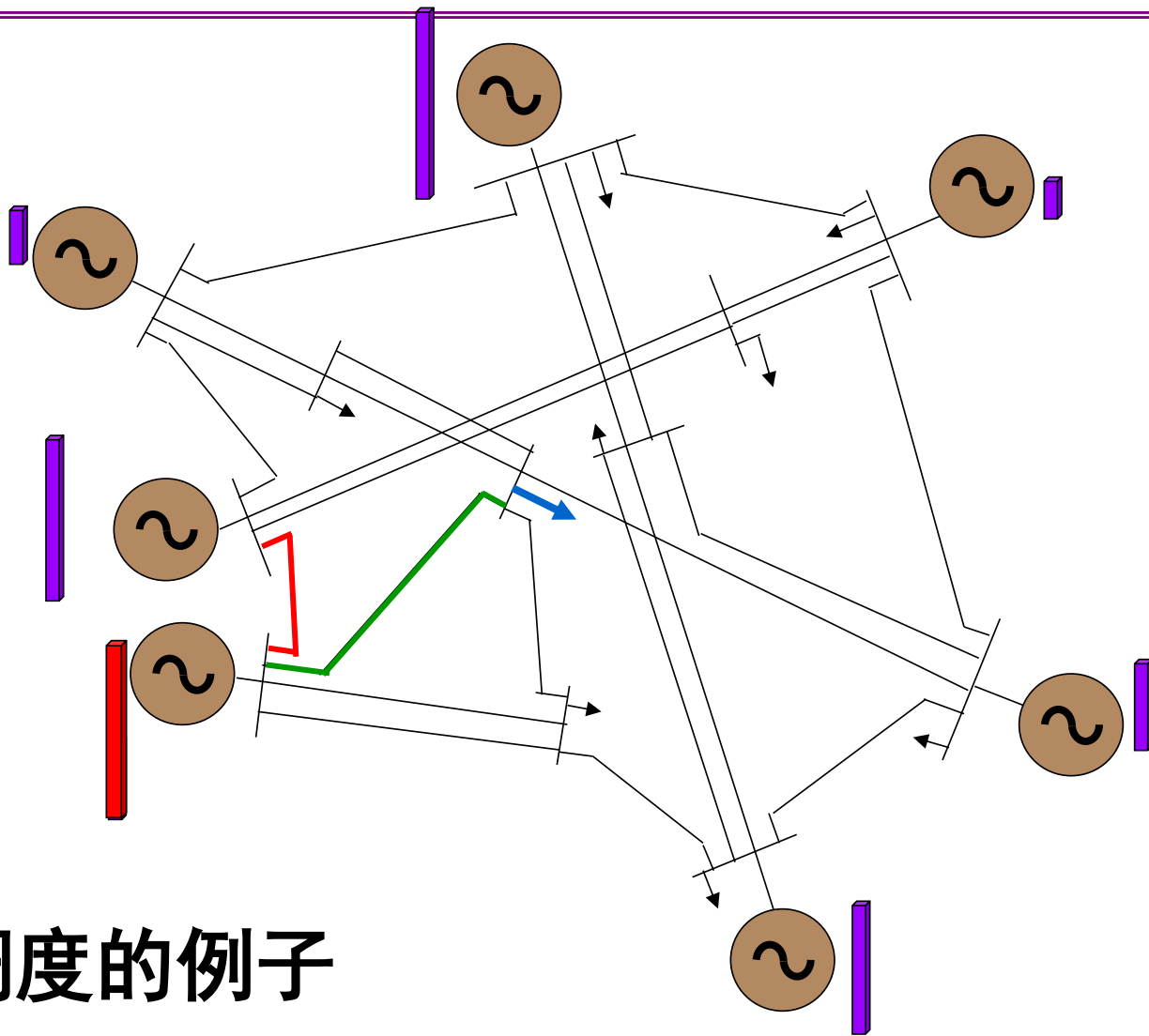
- 掌握基础课知识但缺乏和电力系统相关联
 - 最优化方法

$$\begin{aligned} \min \quad & f(X) \\ s.t. \quad & h(X) = 0 \\ & g(X) \leq 0 \end{aligned}$$

- 电力系统调度



开设本门课程的目的



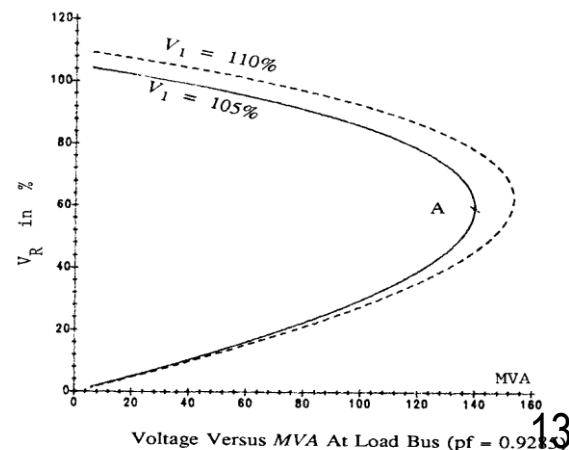
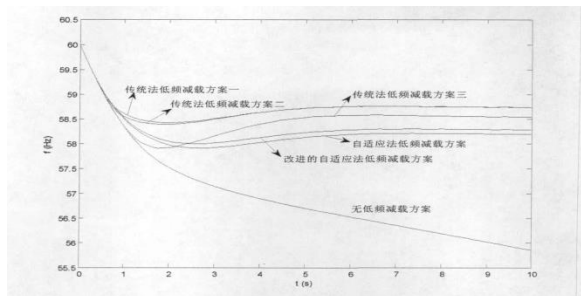
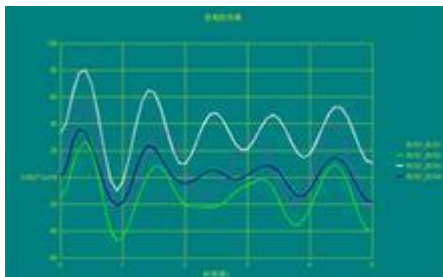
■ 一个调度的例子



开设本门课程的目的

■ 瞎子摸象表现之三

- 具备电力系统局部知识但缺乏整体认识
 - 《电力系统分析》
 - 潮流分布。
 - 《电力系统稳定与控制》
 - 功角稳定
 - 频率稳定
 - 电压稳定





开设本门课程的目的

■ 老师的担心

- 同学们缺乏工程思维
 - 条条大路通罗马
 - 天下没有免费的午餐

技术经济比较

折中的艺术



开设本门课程的目的

■ 同学的烦恼

- 不知道为什么要学这些内容
导致学习上的迷茫
 - 知识碎片化导致的兴趣丧失
 - 兴趣丧失与成绩不佳互为因果
- 不知道各方向的特点导致对未来的焦虑
 - 多个课题组我选哪个？
 - 许多与电有关的企业和部门我喜欢哪个类型的工作？

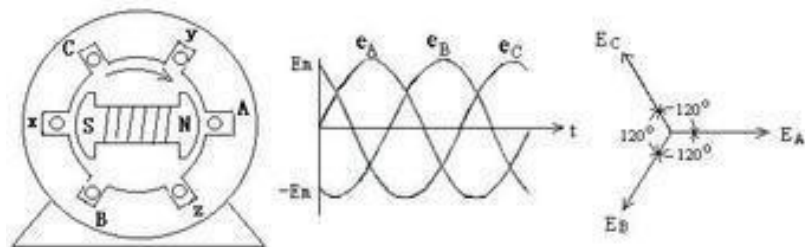
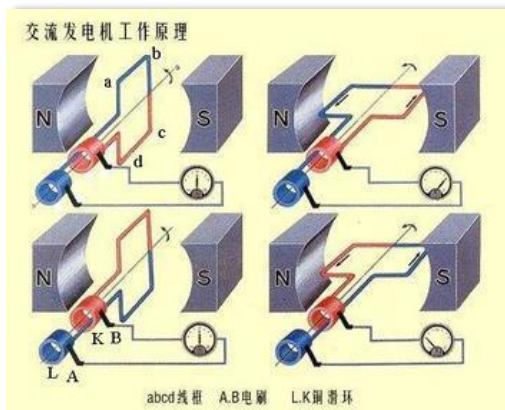




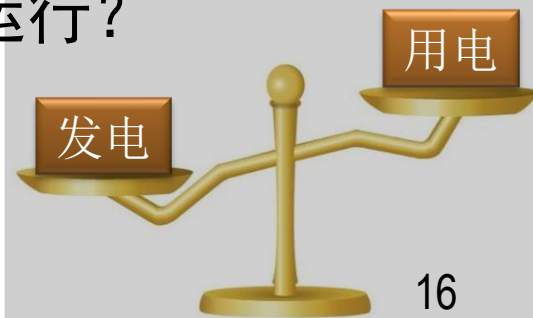
本课程的主要讲授内容

■ 主要讲授内容之一

- 电力系统基本物理特征与运行基本条件
 - 为什么今天的电力系统是今天的样子？



- 为什么今天的电力系统必须如此运行？

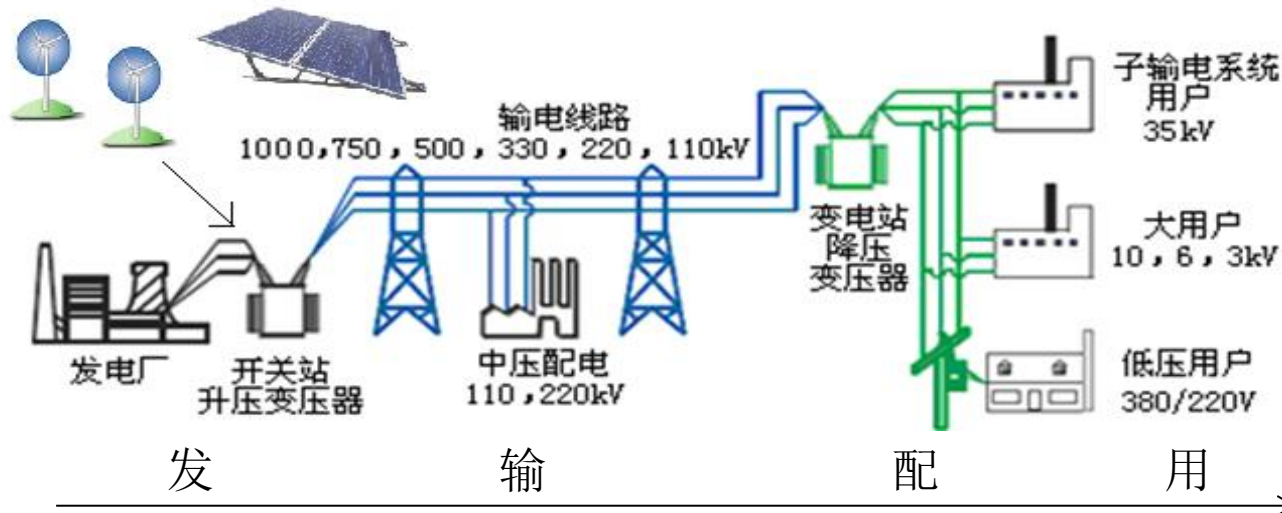




本课程的主要讲授内容

■ 主要讲授内容之二

- 电力系统的基本组成
 - 基本环节



看得见的环节

元件特征

交互影响

系统动态



本课程的主要讲授内容

- 主要讲授内容之二
 - 电力系统的基本组成
 - 基本环节



规划设计



调度控制

看不见的环节

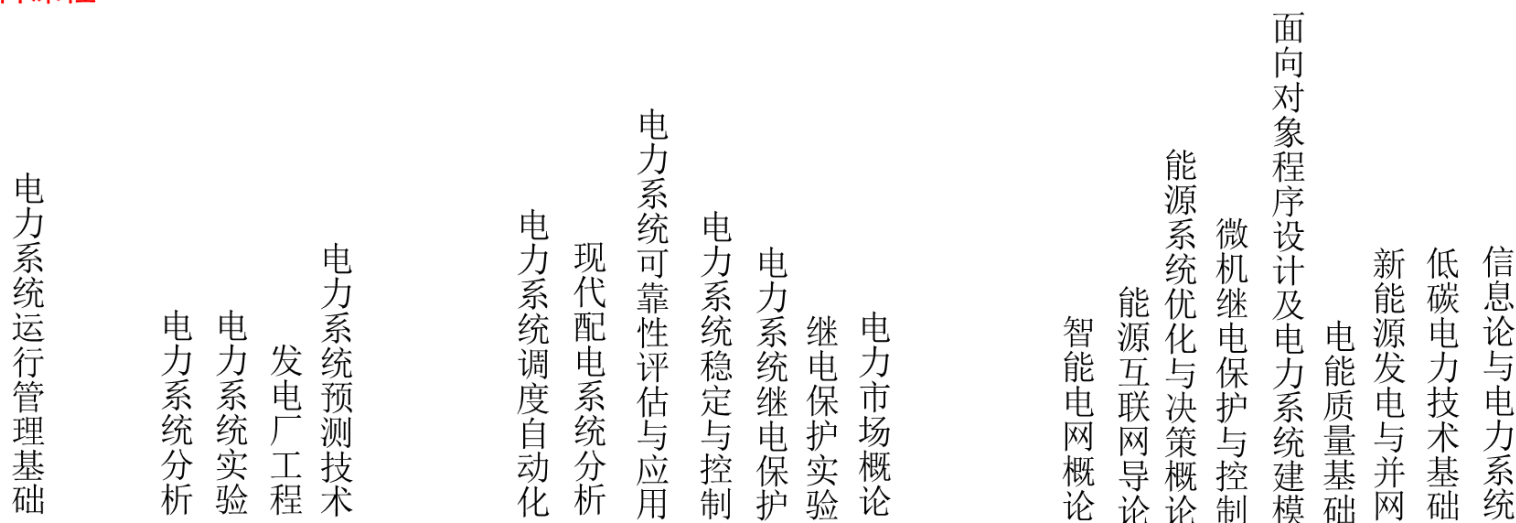


本课程的主要讲授内容

■ 主要讲授内容之二

- 电力系统基本组成与相关课程的关系

本科课程



导论

发输用基础

系统运行关键技术

系统运行扩展技术

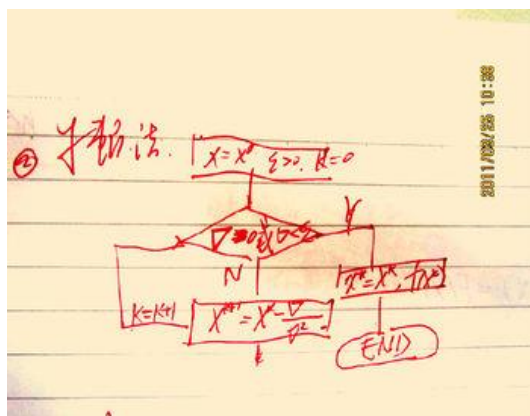


本课程的主要讲授内容

■ 主要讲授内容之三

- 电力系统的运行、调度、控制、管理
 - 基本环节需要解决的关键问题
 - 数学建模
 - 求解方法
 - 遗留问题
 - 未来发展

$$\begin{aligned}
 & \text{obj: } F(X) = \text{opt} \{f_1(x), f_2(x)\} \\
 & \max f_1(X) = \max \sum_j (B_j - C_j) X_j \\
 & \max f_2(X) = - \min \sum_{k=1}^K \sum_j (D_j^k - \sum_i x_{ij}^k) \\
 & \text{s. t. } \sum_{j=1}^{j(k)} x_{ij}^k \leq W_i^k \\
 & L_j^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k \leq H_j^k \\
 & x_{ij}^k \geq 0
 \end{aligned}$$





本课程的主要讲授内容

■ 主要讲授内容之二

- 电力系统运行管理的重要内容但非课程
 - 应急管理
 - 资产管理
 - 电力营销



主要讲授范畴与教学目标

■ 讲授范畴

- 电力系统及其自动化学科

■ 教学目标

- 定性认识
- 浅尝辄止

↓ 全景图





课程讲授方式

- 授课方式：同学调研、课堂汇报(25分钟)、小组提问(20分钟)；老师授课(45分钟)；
- 分组方式：按本学期固定选课人数及可利用周次决定分组数，根据学号；
- 调研方式：题目由老师提前两周发布，同学按组随机选题；
- 汇报方式：组内同学自行分工，每人都有展示的机会；
- 互评方式：指标老师给定，供同学参考；各小组给做报告的小组评分并签名；
- 最终成绩：学生给分*0.5+教师给分*0.5；缺课两次及以上记不通过。



这节课讲什么？

电力系统的基本特征

电力系统的定义和基本特征是什么？⁺

为什么当前的电力系统以交流为主？⁺

为什么要三相传输？

为什么中国需要大功率远距离输电？

为什么世界范围内的电网都具有一定规模（是互联的）？

中国互联电网的结构是什么？



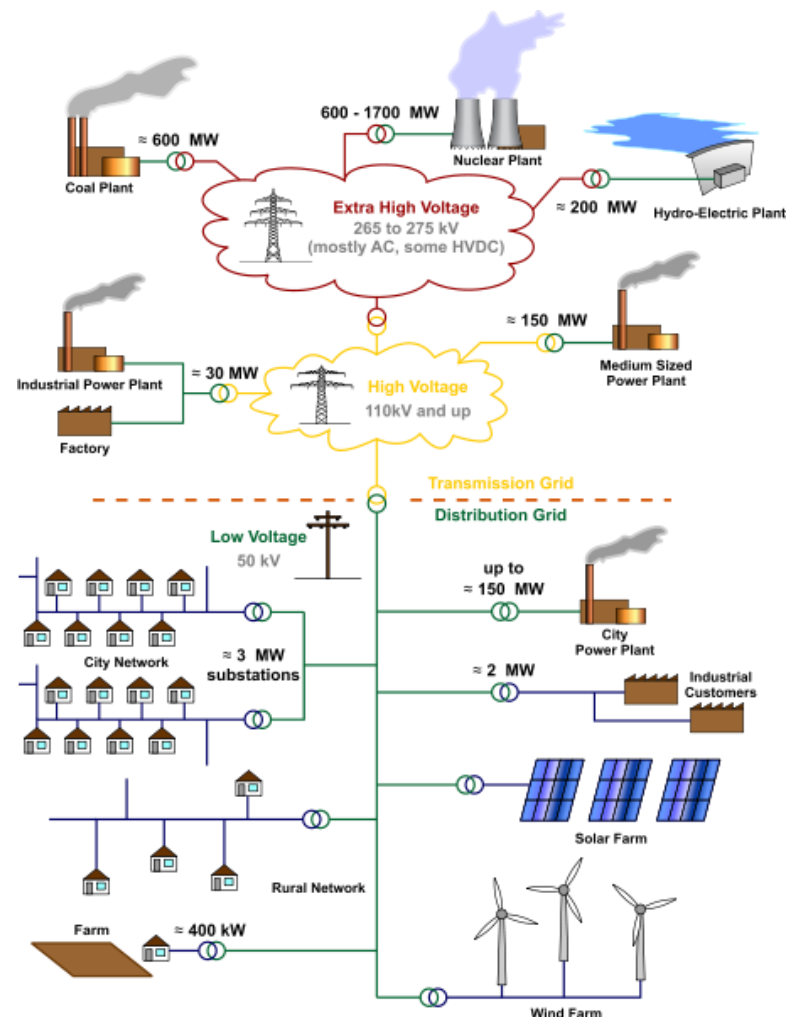
电力系统定义与基本特征

http://en.wikipedia.org/wiki/Power_system

An **electric power system** is a network of electrical components used to supply, transmit and use electric power.

百度百科

- 由发电、输电、变电、配电和用电等环节组成的电能生产与消费系统。
- 它的功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置转化成电能，再经输电、变电和配电将电能供应到各用户。
- 为实现这一功能，电力系统在各个环节和不同层次还具有相应的信息与控制系统，对电能的生产过程进行测量、调节、控制、保护、通信和调度，以保证用户获得安全、经济、优质的电能。





电力系统定义与基本特征

■ 当今电力系统的基本特征

- 交流系统为主
- 三相交流传输
- 大功率远距离输电
- 大区联网

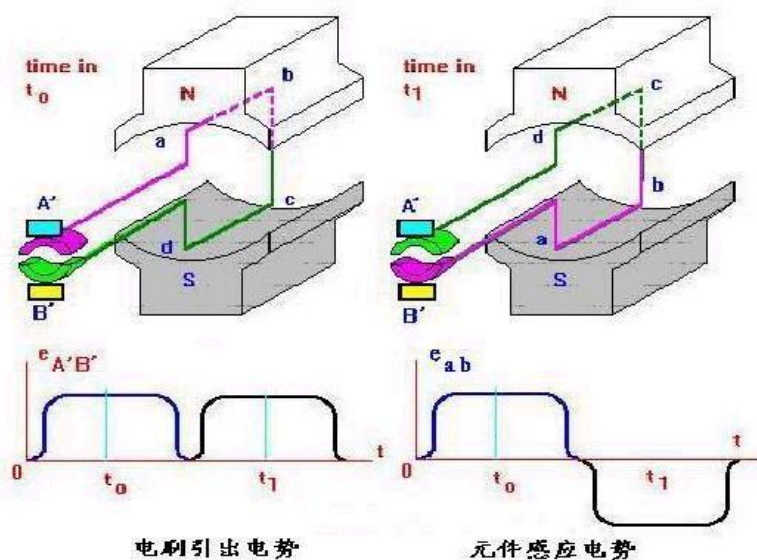




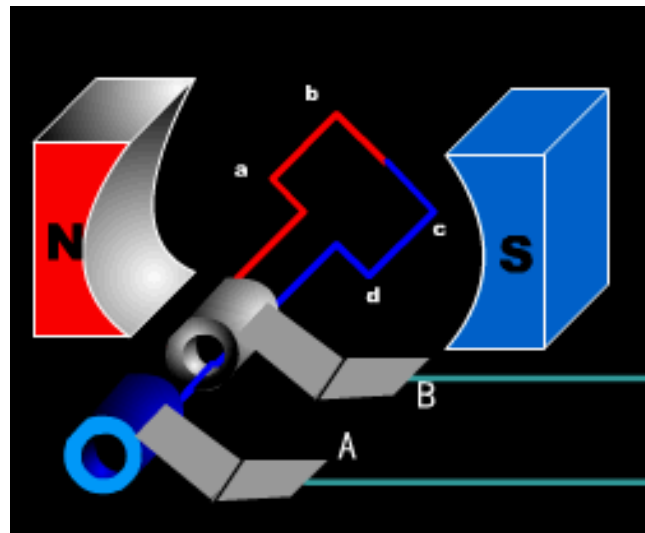
电力系统定义与基本特征

■ 历史上的交直流之争

- 从发电原理看



直流电机发电原理

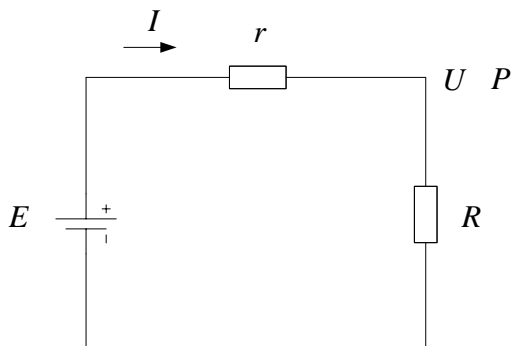


交流电机发电原理



电力系统定义与基本特征

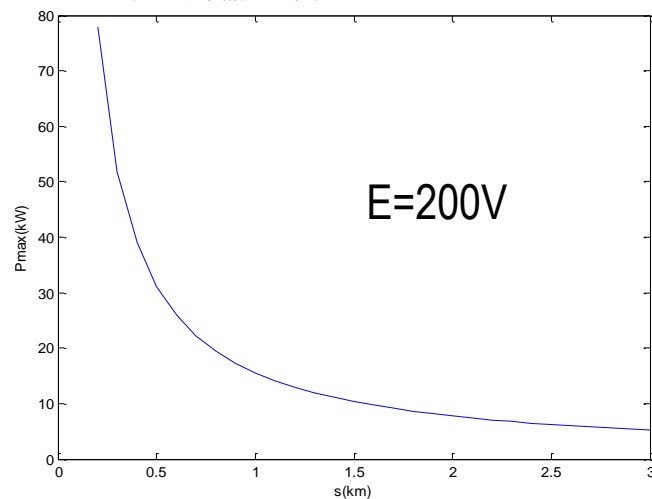
历史上的交直流之争 - 从输电需求看



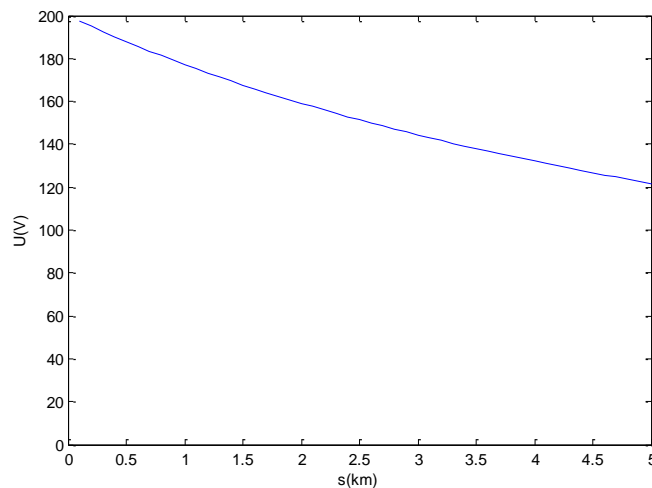
$$P = \frac{E^2}{(R + r)^2} R \quad P_{\max} = \frac{E^2}{4r}$$

线路类型	$R/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$X/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	R/X
低压线路	0.642	0.083	7.70
中压线路	0.161	0.190	0.85
高压线路	0.060	0.191	0.31

最大传输功率随距离的变化曲线



负载电压随线路长度的变化曲线

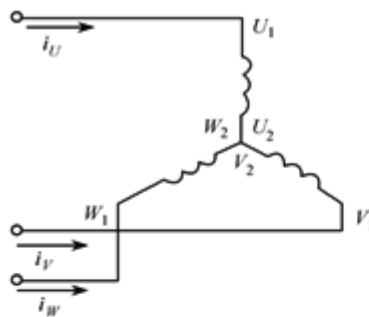




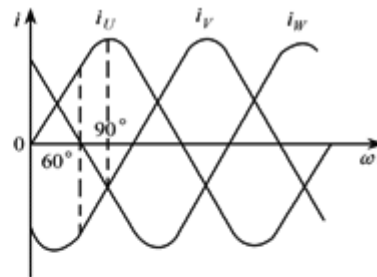
电力系统定义与基本特征

历史上的交直流之争

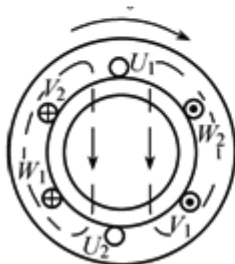
- 从用电需求看（交流电动机）



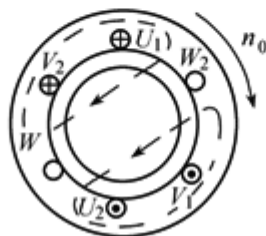
(a) 三相对称绕组 Y 形联结



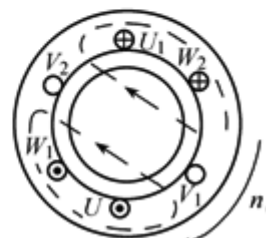
(b) 三相对称电流的波形



(a) $\omega t = 0^\circ$



(b) $\omega t = 60^\circ$



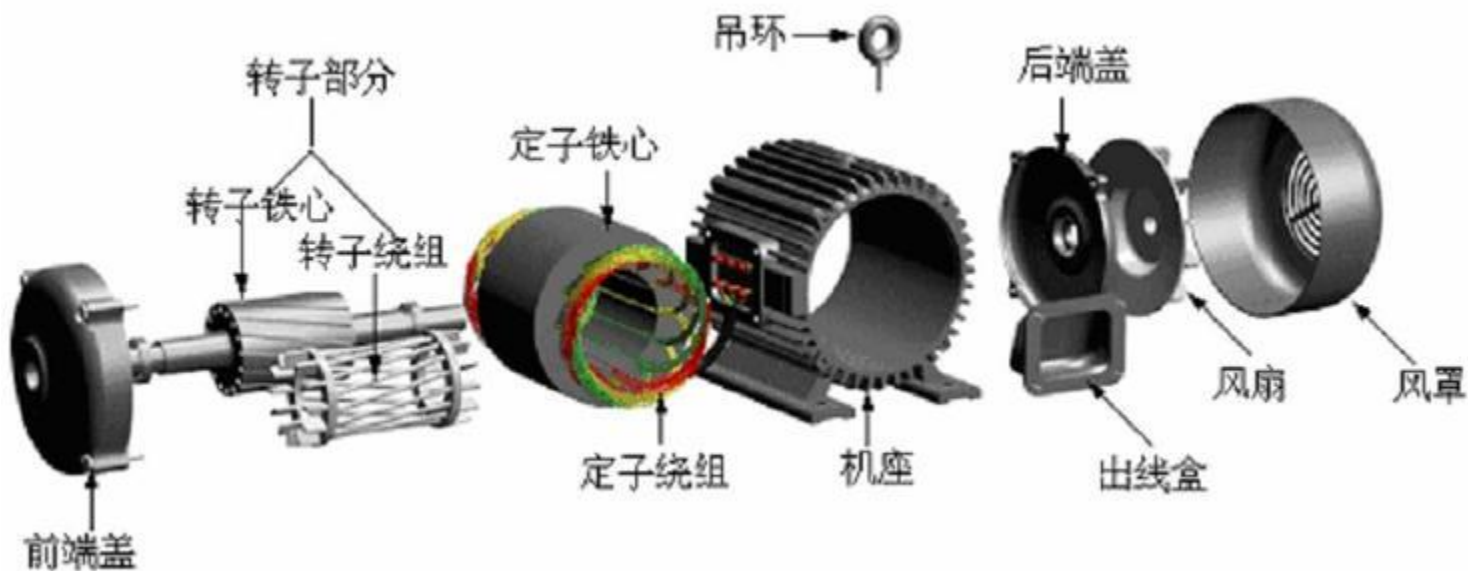
(c) $\omega t = 120^\circ$

交流电动机工作原理



电力系统定义与基本特征

- 历史上的交直流之争
 - 从用电需求看（交流电动机）



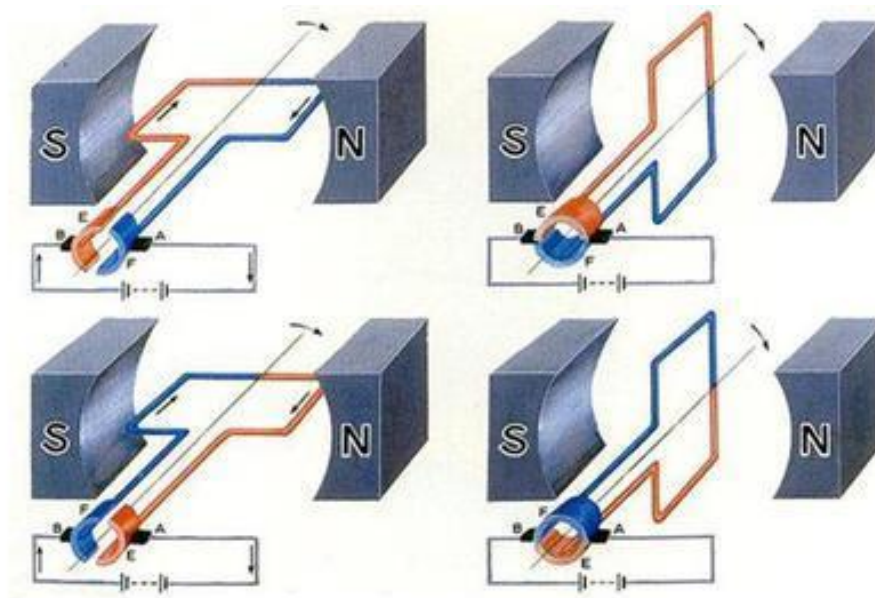
交流电动机（鼠笼电机）结构



电力系统定义与基本特征

■ 历史上的交直流之争

- 从用电需求看（直流电动机）



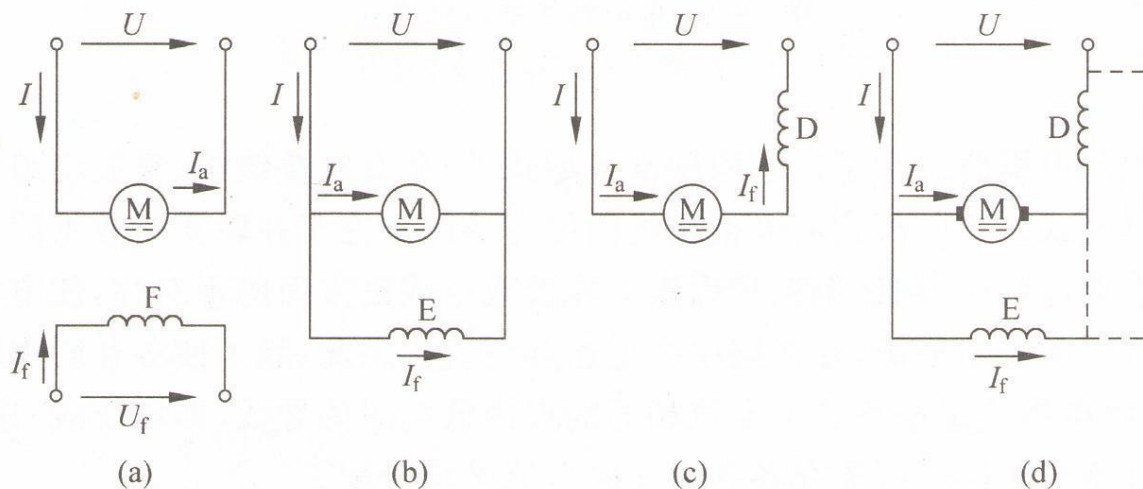
直流电动机工作原理



电力系统定义与基本特征

历史上的交直流之争

- 从用电需求看（直流电动机）



(a) 他励；(b) 并励；(c) 串励；(d) 复励

直流电动机的励磁方式



电力系统定义与基本特征

■ 历史上的交直流之争

- 从用电需求看交流异步电动机的优势

- 结构简单
- 启动电流小
- 容量可以较大



电力系统定义与基本特征

交流传输的运行限制



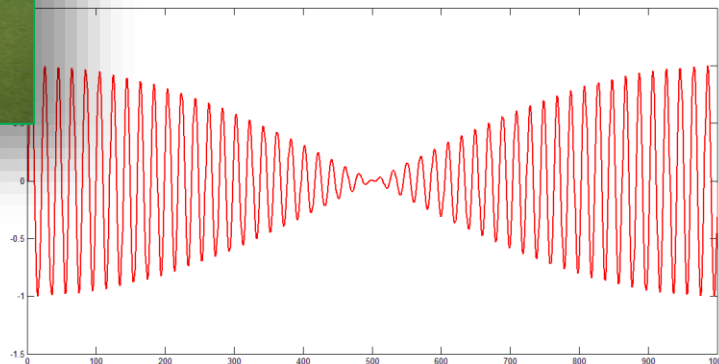
发电机的同步约束

$$U \sin(\omega_2 t)$$

G2

$$U_{load} = \frac{U}{2} (\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t))$$

$$= U \sin\left(\frac{\omega_1 t + \omega_2 t}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_1 t - \omega_2 t}{2}\right)$$





电力系统定义与基本特征

- 交流传输的运行限制
 - 有功平衡



我知道为什么电力系统要保持有功平衡

A 是

B 否

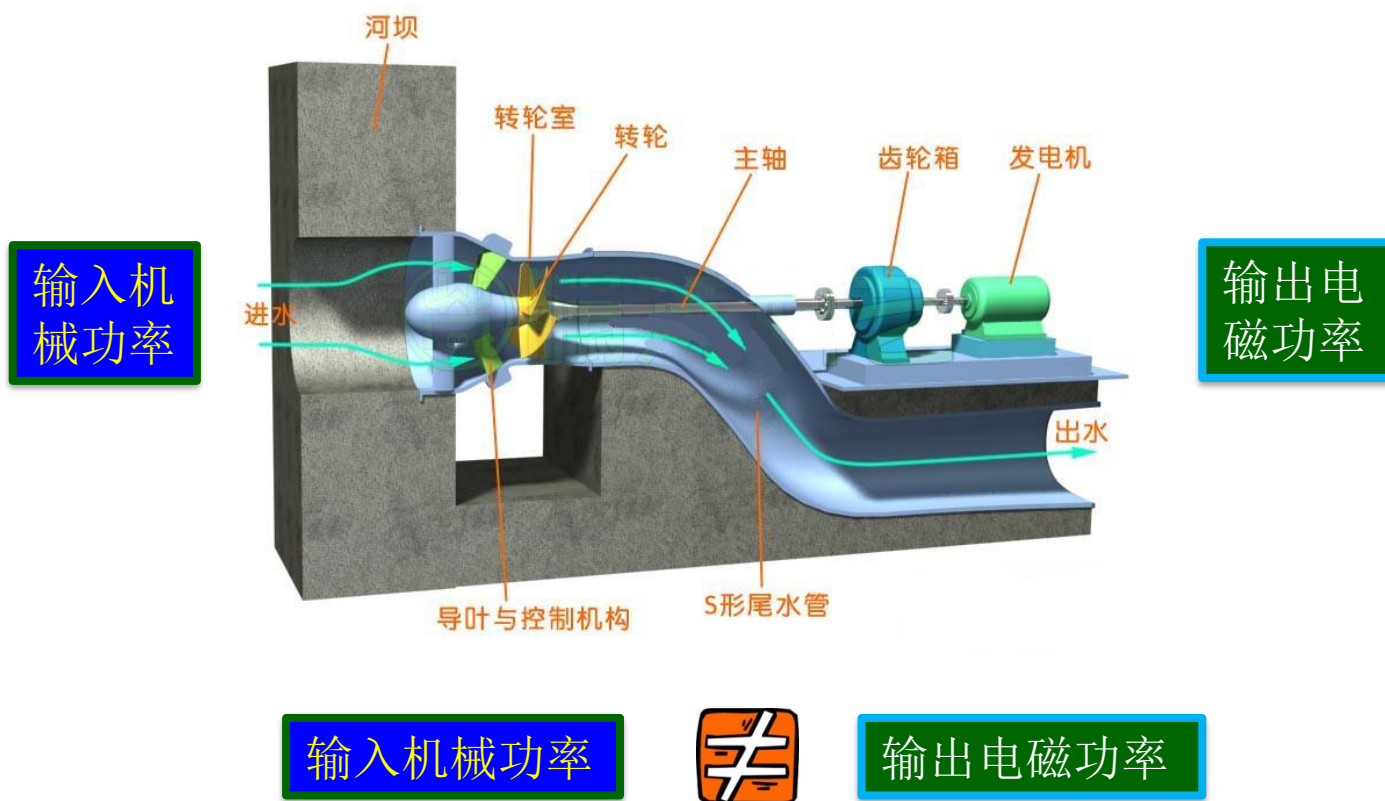
提交



电力系统定义与基本特征

■ 交流传输的运行限制

- 有功平衡

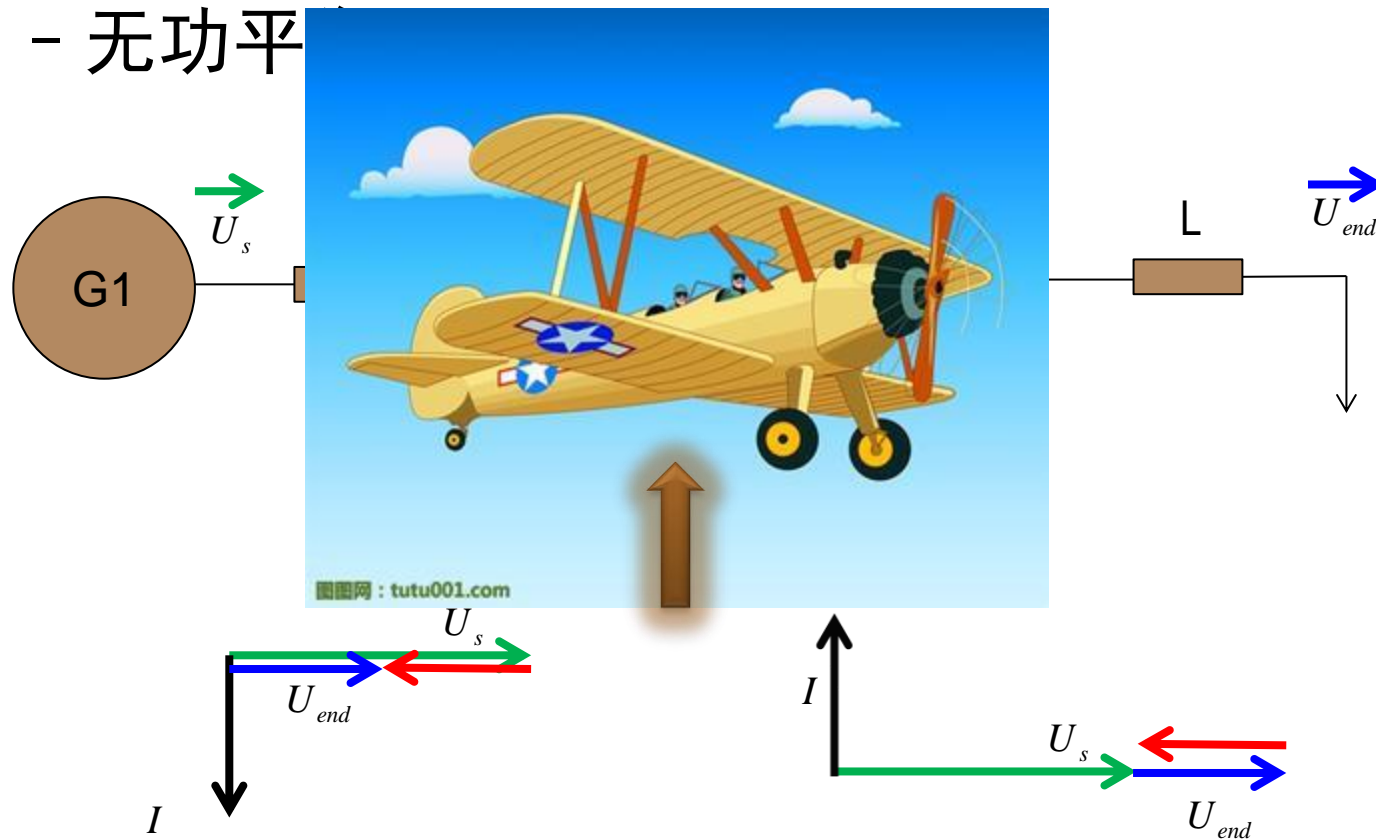




电力系统定义与基本特征

■ 交流传输的运行限制

- 无功平衡





电力系统定义与基本特征

■ 爱迪生的复仇 —— 直流系统的发展

- 发电端
- 输电系统
- 用电系统

- 推手 — 电力电子技术的发展



电力系统定义与基本特征

■ 三相传输的必然性

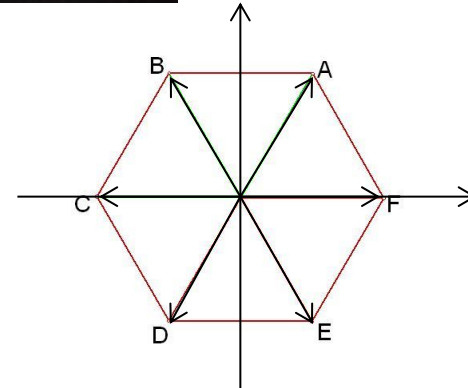
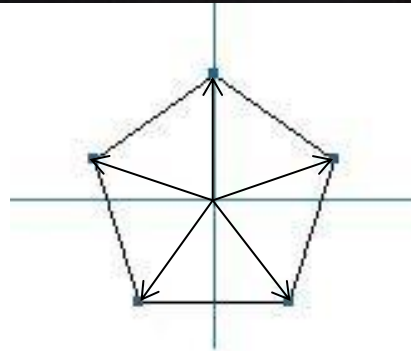
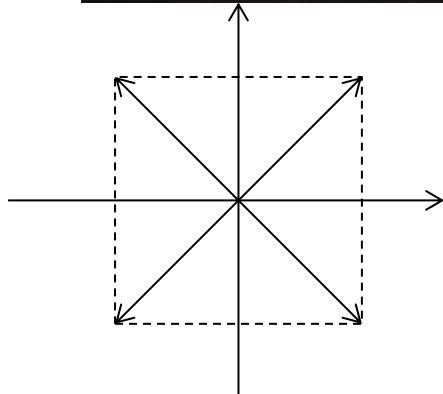
– 中线的作用

$A \sin \alpha$

为什么

之和不是也为0吗？

– 线电压





电力系统定义与基本特征

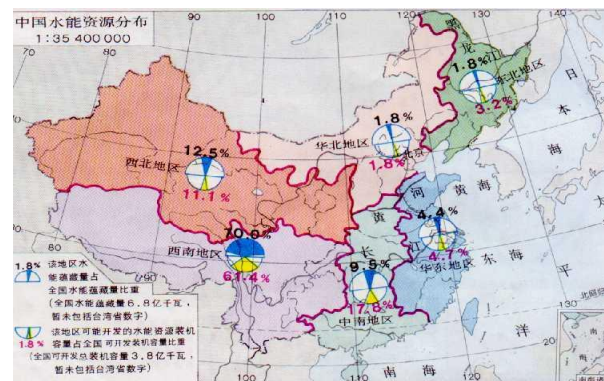
■ 大功率远距离传输的必要性

- 资源禀赋与负荷分布

煤

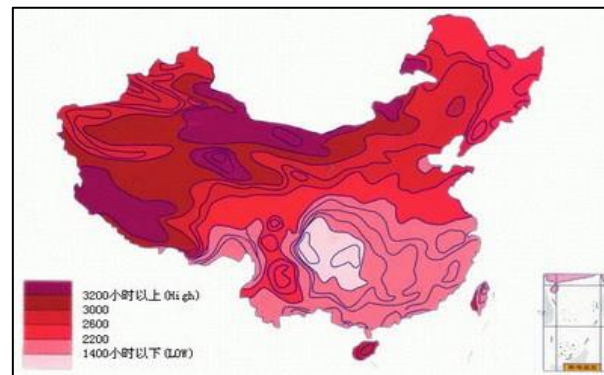
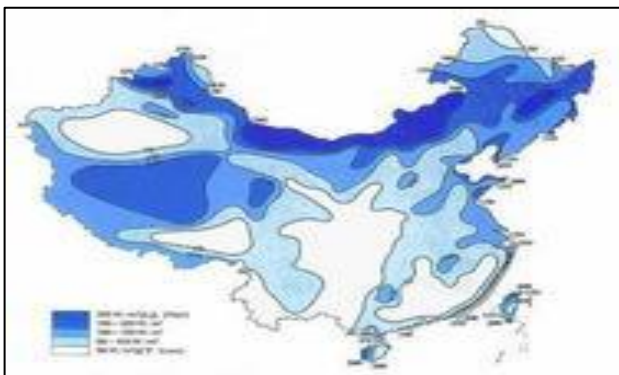


水



光

风





电力系统定义与基本特征

■ 大功率远距离传输的必要性

- 设备的效率

中国2011年度100万千瓦超超临界火电机组能效指标统计

序号	电厂名称	机组编号	容量(万千瓦)	投产日期	供电煤耗(克/千瓦时)	厂用电率(%)	油耗(克/万千瓦时)	耗水率(千克/千瓦时)
1	国电浙江北仑	6	100	2008.12.20	283.5	3.66	0.12	0.25
2	华能广东海门	1	100	2009.06.07	284.35	3.78	0.12	0.13
3	华能浙江玉环	1	100	2006.11.28	284.69	4	36.45	0.26
4	国电浙江北仑	7	100	2009.06.02	285.5	3.15	0.23	0.25
5	大							0.19

机组容量越大，参数会越高，因此发电效率也会越高

序号	电厂名称	机组编号	容量(万kW)	投产日期	供电煤耗(g/kWh)	厂用电率(%)	油耗(4g/kWh)	耗水率(kg/kWh)
1	大唐山东黄岛	6	66	2007.11.14	295.83	4.02	0	0.18
2	大唐浙江乌沙山	2	60	2006.07.09	296.62	4.05	19.7	0.23
3	中电投安徽田集	2	63	2007.10.15	296.91	3.5	0	1.63
4	华润安徽阜阳	1	64	2006.06.20	298.07	4.36	0.06	1.82
5	国电江苏常州	2	63	2006.11.30	298.68	4.5	0	0.35



电力系统定义与基本特征

■ 大区联网的必要性



中国互联电网（2006）



美国互联电网



电力系统定义与基本特征

■ 大区联网的必要性

- 可以**合理利用能源**, 加强环境保护。
- 可安装大容量高效能机组, 有利于降低造价, 提高**能源利用效率**。
- 可以利用时差、温差, **错开用电高峰**, 利用各地区用电的非同时性进行负荷调整, **减少备用容量和装机容量**。
- 可以在各地区之间互供电力, 互为备用, 可**减少事故备用容量**, 增强抵御事故能力, 提高电网安全水平和供电可靠性。
- 能承受较大的冲击负荷, 有利于**改善电能质量**。
- 可以跨流域调节水电, 并在更大范围内进行**水火电经济调度**, 取得更大的经济效益。



电力系统的形成与发展

■ 早期电力系统（初期）

- 1881年，在英国的哥德尔明（Godalming），世界第一个发电厂被建立起来，两台水轮机通过交流电为7盏电弧灯、34盏白炽灯供电。
- 1882年，，托马斯·爱迪生在纽约建立起了第一个蒸汽火电站，利用直流电能为珠宝街（Pearl Street）的3000盏电灯供电





电力系统的形成与发展

■ 早期电力系统（初期）

- 电能由发电机产生，直接通过线路输送到负荷侧；
- 没有变电或者配电的环节；
- 负荷只有白炽灯和电弧灯，工作电压很低（100V~200V），故发电机出口电压也很低；
- 电力的输送必须是近距离的，通常是距离发电厂800米（半英里）之内，形成一个以发电厂为中心的小电网。



电力系统的形成与发展

■ 早期电力系统（初期）

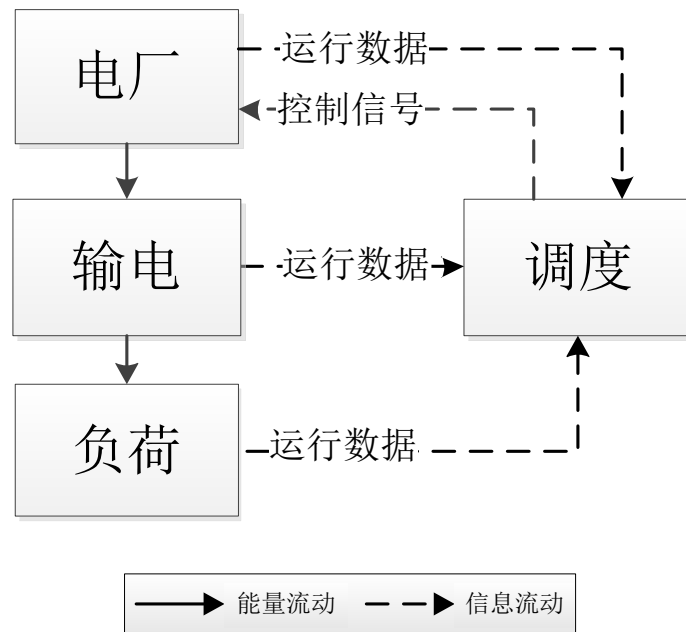
- 电力线路并未形成网络，而仅仅是作为发电厂和负荷之间的连接线；
- 电力线路上没有可控设备，调度内容主要是根据负荷的变化改变电厂的发电机出力，保证电网的频率和电压稳定；
- 调度内容主要是调节发电厂中发电机，因此调度中心也往往设置在发电厂内。



电力系统的形成与发展

■ 早期电力系统（初期）

- 调度中心收集电厂、输电线路、负荷的运行数据；
- 判断电网的运行状态，并根据其变化对电厂中的发电机或原动机发出控制信号；
- 保证电力线路和负荷的稳定。



电力系统发展初期电网运行形态



电力系统的形成与发展





电力系统的形成与发展

■ 早期电力系统（中心站系统时期）

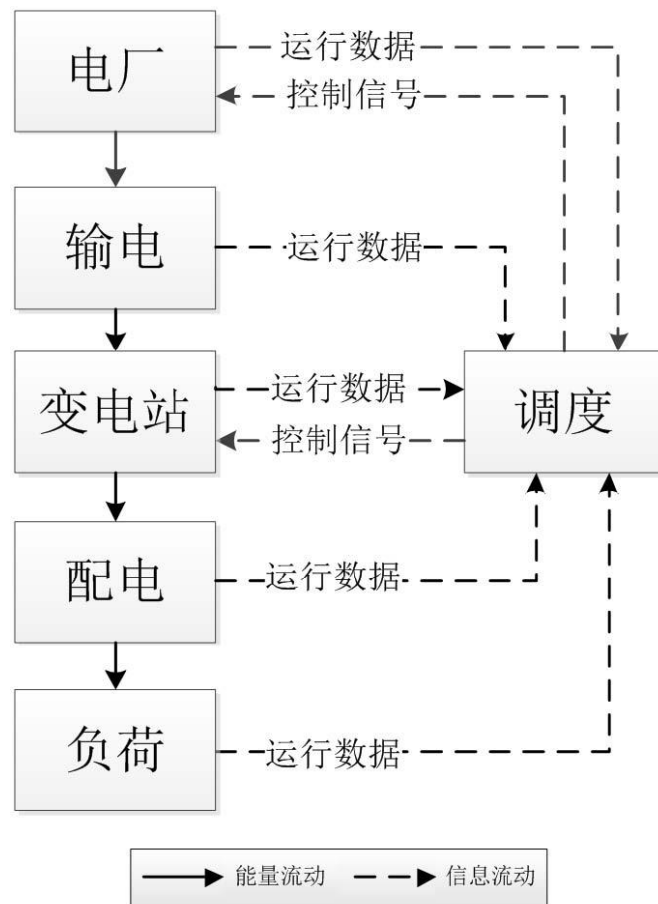
- 低压配电网也在19世纪90年代逐渐形成；
- 电厂将电能通过高压输电线输送到建造在城市当中的中心变电站（central station）中，在变电站中降压，再通过低压配电线将电能直接输送到负荷处；
- 既满足了负荷范围扩大的需要，又避免了建造多条高压输电线路所带来的经济负担，同时在城市中采用低电压等级输电也保证了人身安全。



电力系统的形成与发展

■ 中心站系统时期

- 调度中心从发电厂中独立出来，成为了一个单独的运行部门；
- 调度中心要收集电厂、输电线路、变电站、配电网线路和负荷的运行数据，并根据这些数据做出控制决策；
- 调度的主要内容是控制电厂的发电量，以及变电站的有功和无功功率分配。



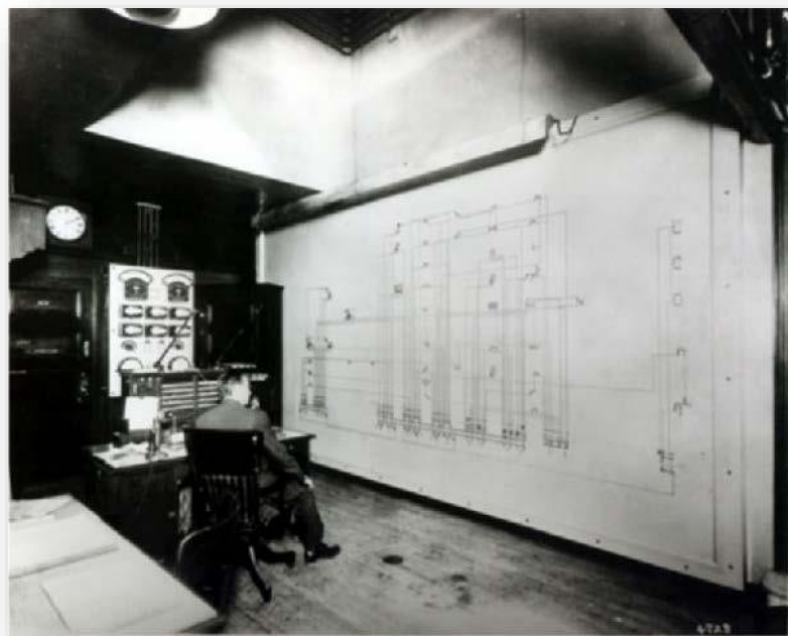
中心站系统时期电网运行形态



电力系统的形成与发展

■ 中心站系统时期的调度中心

- 输电和配电网的拓扑图形，从中可以看到电网的连接；
- 一些电表，指示着电网各个部分所传送过来的运行数据的值；
- 调度指挥信号通过桌面上的通信设备传输到电厂和变电站中，做出相应的调整动作。



1919年的调度中心



电力系统的形成和发展

■ 输电网的形成

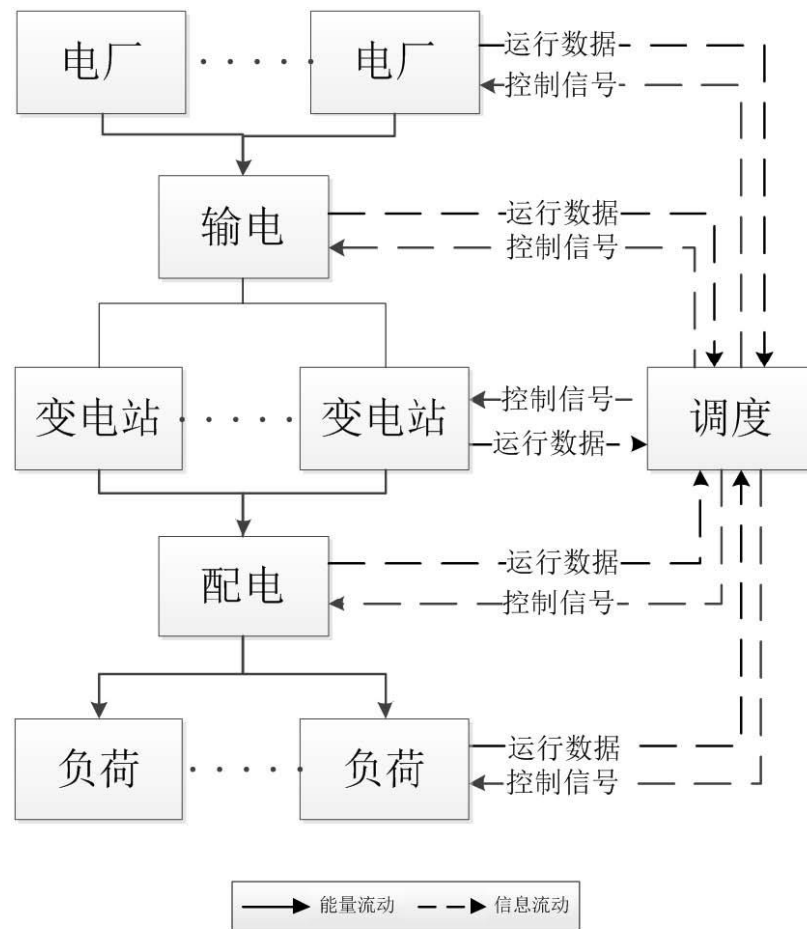
- 1909年，美国有的电力公司开始利用输电线，将自己的几个小的电网连接起来，统一调度指挥，以实现减少总装机容量、降低输电成本；
- 随着工业用电的急剧增长，单独的一个或者两个电厂已经不能够满足工业用电的需求。开始采用高压线路将附近各座不同类型、不同公司的发电厂相连，形成地区电网；
- 19世纪20年代，地区电网之间开始互联；
- 1924年，美国的输电电压等级从132kV提升到154kV，几年之后便建成了几个150kV和220kV的电网；
- 到50年代，世界各国充分认识到电网的优越性，电网的规模也越来越大，电力工业进入了大电网时期。



电力系统的形成和发展

■ 输电网的形成

- 由于电网所跨域的区域相比原来的地区电网大大增加，电网故障的波及范围也随之增加，电网的调度对于电网的正常运行也就更加重要；
- 相比地区电网，调度中心所得到的区域电网的测量数据大大增加，每一条线路、每一个变电站的数据都会汇总到调度中心。



输电网形成时期电网运行形态



电力系统的形成和发展

■ 输电网的形成

- 由于远动装置的发展，此时电力线路上的断路器等设备可以直接完成远方动作；调度对象包括电厂、输电网、变电站和配电网；
- 电网的互联会带来很多的问题，调度的内容不仅包括有功、无功能量的产生和分配，还包括电力系统的潮流计算、经济调度、电力装置保护、负荷预测等内容；
- 如果所调度线路的功率传输涉及到两个电力公司之间的，那么调度中心还需要做好两个电力公司之间的调度协调工作。



电力系统的形成和发展

■ 输电网的形成



1934年费城30街的调度中心



电力系统的形成和发展

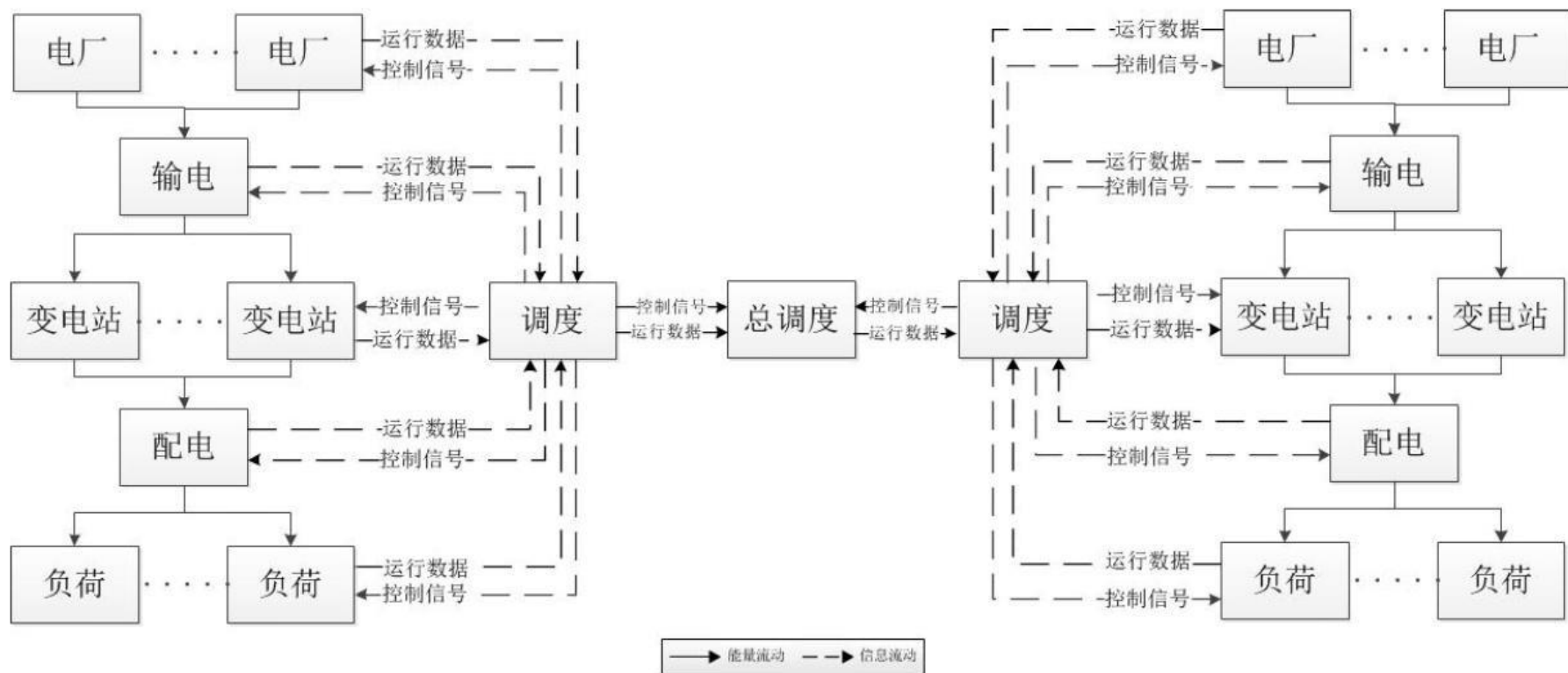
■ 互联大电网的形成

- 20世纪50年代开始，出现了330kV及以上的超高压互联电网，跨区域的大电网逐渐形成。
- 大电网的形成，有助于电网的稳定，因为小的干扰或者冲击对大电网所造成的影响很小；
- 电网规模的扩大也有利于故障规模的扩大。一个很小的故障，可以在很短的时间内扩大到一大片区域，给整个电网的稳定和安全带来隐患；
- 调度的重要性更加显著。



电力系统的形成和发展

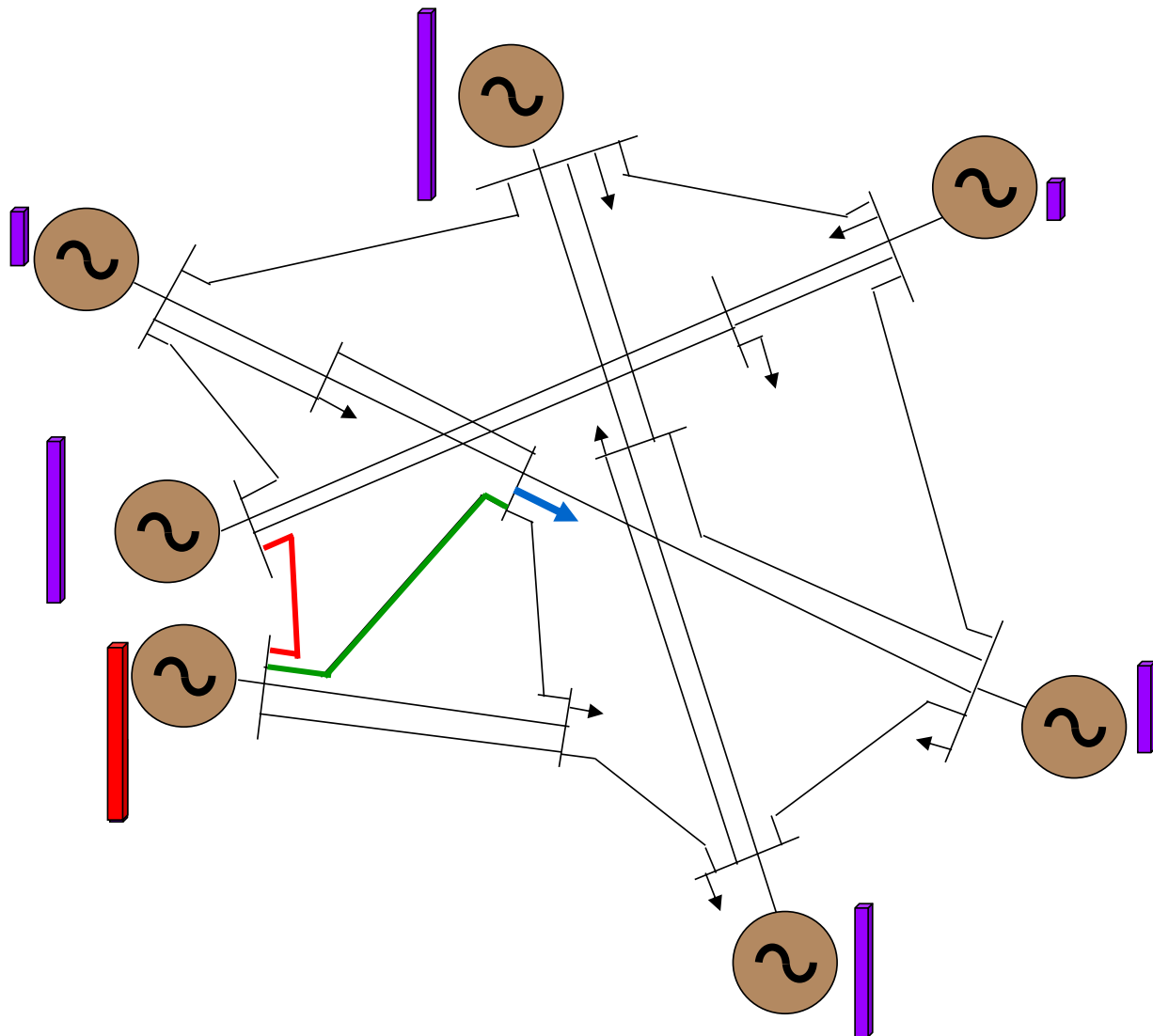
■ 互联大电网的形成



互联大电网时期的调度形态



电力系统调度的作用示例



- 潮流计算
- 稳定计算

- 经济调度
- 检修安排

- 保护设定
- 安稳配置



电力系统的形成和发展

■ 互联大电网的形成

- 分层调度主要有以下几方面的优点：

1. 易于保证自动化系统的可靠性；
2. 可灵活地适应系统的扩大和变更；
3. 能更好地适应现代技术水平的发展；
4. 便于协调控制，调度任务分散化，提高工作效率和处理能力；
5. 改善系统响应：任务分散和并行处理，加快了调度决策的处理速度。



电力系统的形成和发展

■ 互联大电网的调度中心



2003年德国斯图加特地区的Neckarwerke Stuttgart AG调度中心



电力系统的形成和发展

■ 互联大电网的调度中心



国家电网调度中心



电力系统的形成和发展

■ 我国过去长期施行的五级调度

- 1) 国家调度中心，简称国调，是我国电网调度的最高级，在该中心，通过计算机数据通信与各大区调度中心相连接，协调确定各大区之间的联络线潮流和运行方式，监视、统计和分析全国电网的运行情况；
- 2) 网局调度中心，简称网调，按统一调度、分级管理原则，负责超高压网的安全运行并按规定的发电计划及监控原则进行管理，提高电能质量和经济运行水平；
- 3) 省级调度中心，简称省调（各省、自治区、直辖市电网公司），按统一调度、分级管理原则，负责省内电网的安全运行并按规定的发电计划及监控原则进行管理，提高电能质量和经济运行水平。



电力系统的形成和发展

■ 我国过去长期施行的五级调度

- 4) 地区调度中心，简称地调（各省地级市电力局、电业局、供电局），采集当地网的各种信息，进行安全检测，进行有关站点开关的远方操作，变压器分接头的调节，电力电容器的投切等；
- 5) 县级调度中心，简称县调（各县级市供电局），为我国电网调度的最低级，主要监控10KV及以下农村电网的运行。

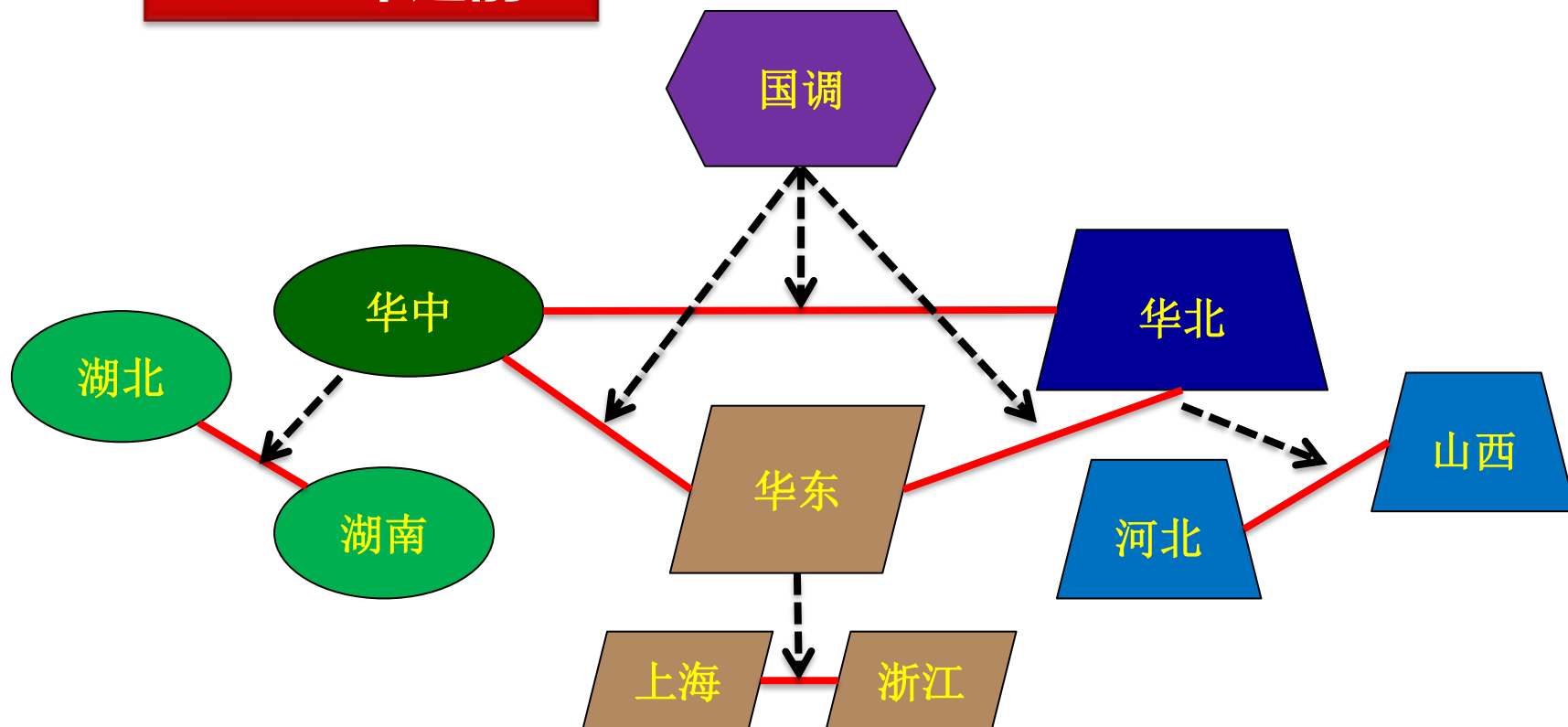
每一级的调度中心，不仅需要直接管辖它所负责的电压等级的发电厂、线路和变电站，还要听从上一级调度中心的调度任务和安排，并在必要时对下一级调度中心发出调度或者控制指令，指导下一级调度中心的正常工作和运行。



电力系统的形成和发展

■ 五级调度示意图（国调-网调-省调-地调-县调）

2012年之前



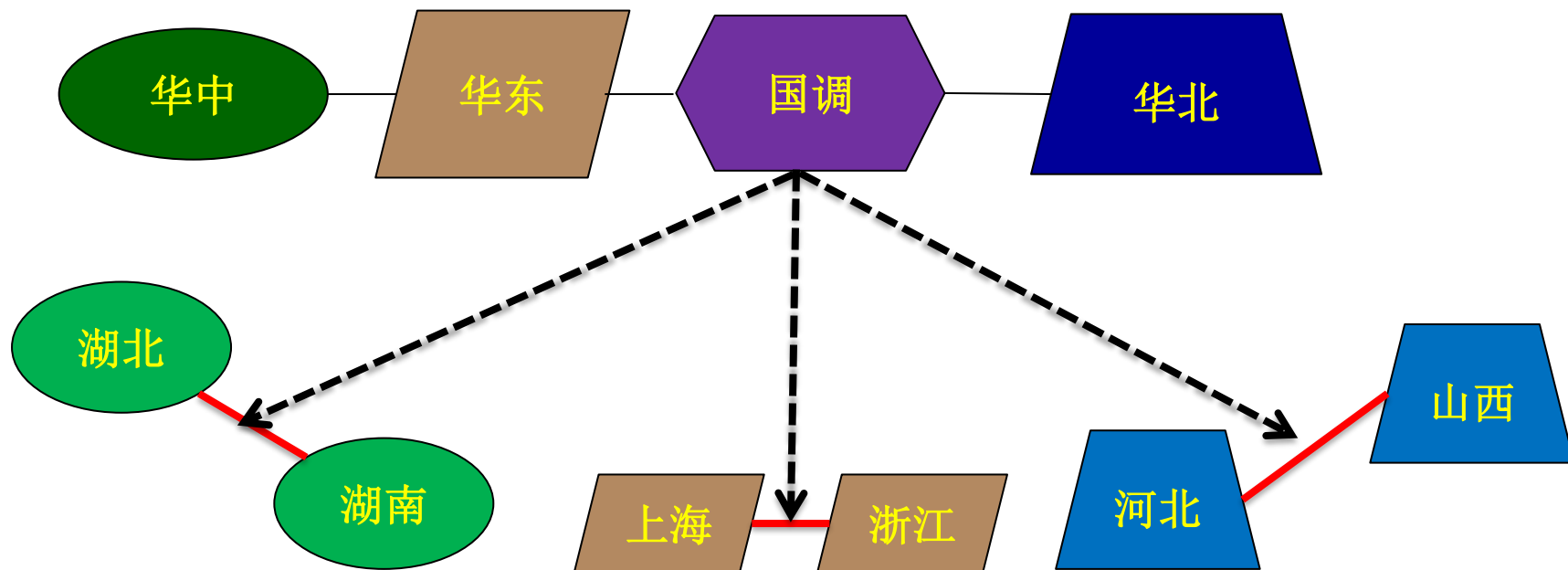


电力系统的形成和发展

■ 扁平化调度示意图（国调-省调-地调-县调）

2012年之后

取消了网调，成立备调中心

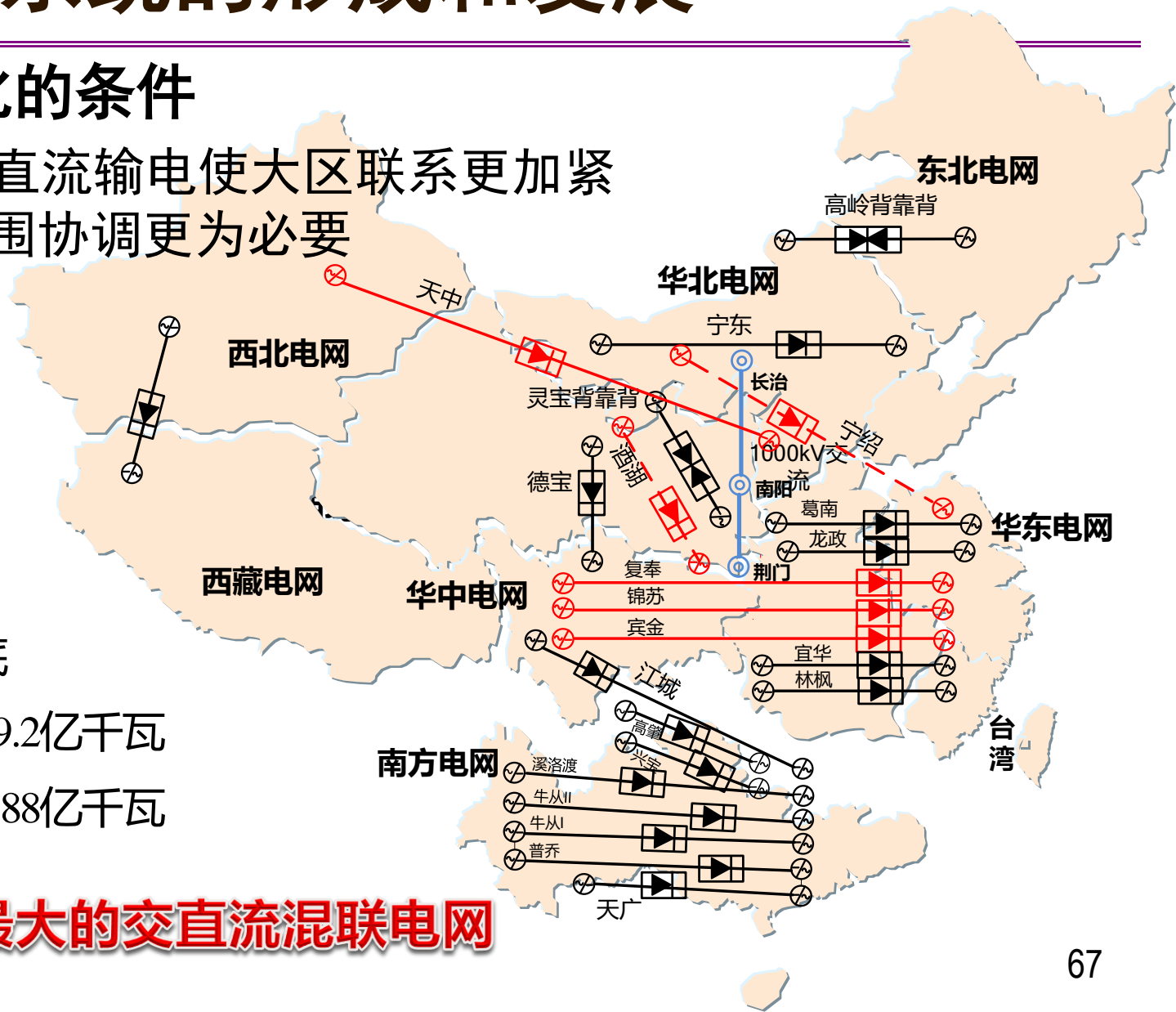




电力系统的形成和发展

■ 调度扁平化的条件

- 特高压交直流输电使大区联系更加紧密，大范围协调更为必要



截止2023年底

- 装机容量29.2亿千瓦
- 跨区输电1.88亿千瓦

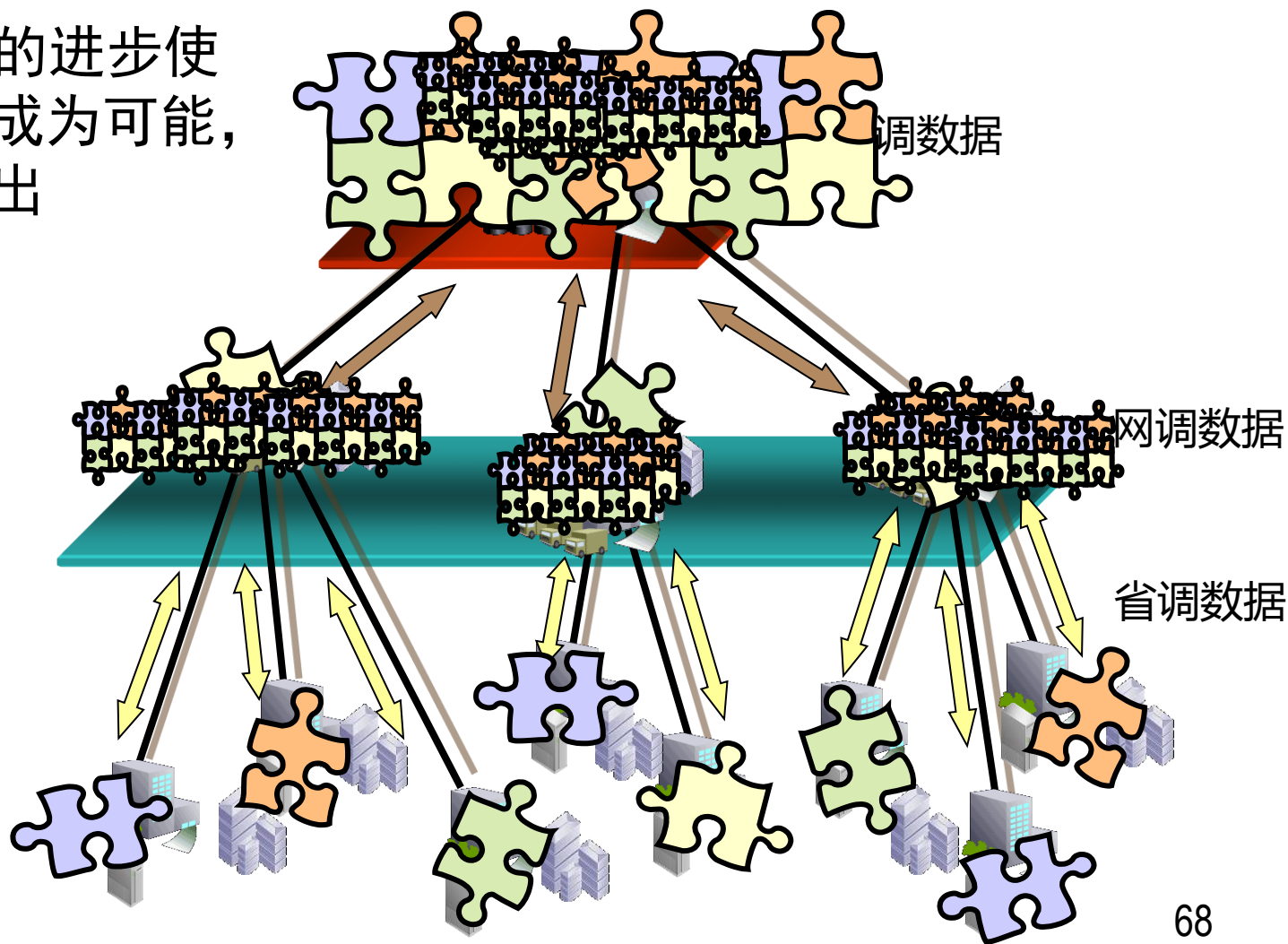
世界规模最大的交直流混联电网



电力系统的形成和发展

■ 调度扁平化的条件

- 调度技术的进步使得扁平化成为可能, 优势更突出

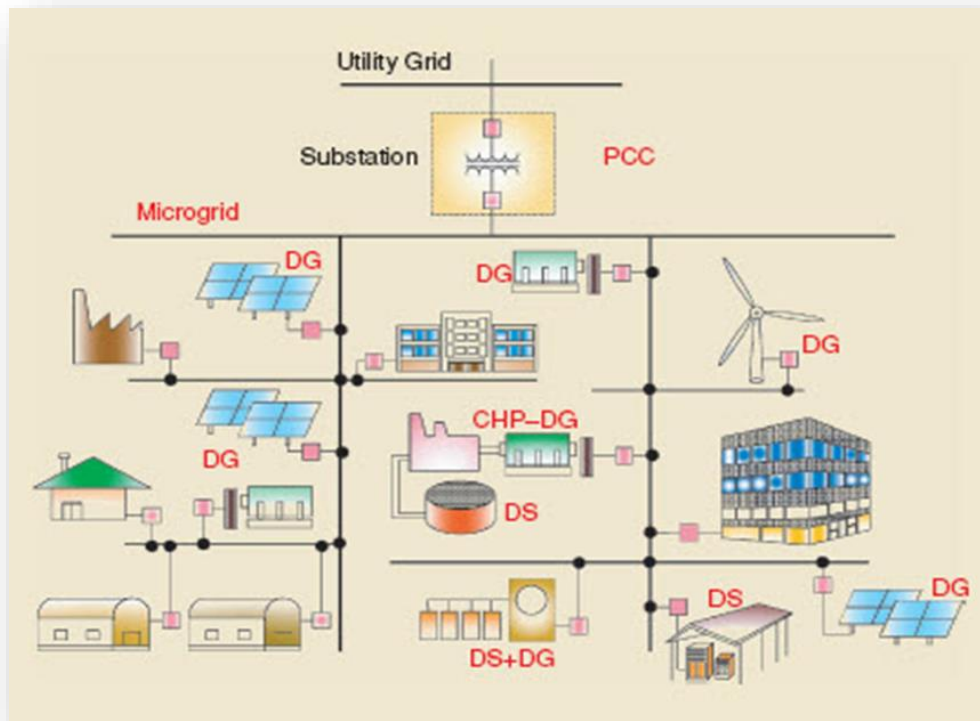




电力系统的形成和发展

■ 未来的电网公司

- 新能源的发展是否会威胁传统的集中化供电模式；





电力系统的形成和发展

■ 未来的电网公司

- 电力市场的发展是否会导致电网公司管道化；





电力系统的形成和发展

■ 未来的电网公司

- 电费之争；

太阳能用户使用的集中供电减少，支付的电费减少

电力公司的经营费用，电网的维护和开发费用减少

如果当地采用“净用电量”计价模式，相当于暗中补贴



电力系统的形成和发展

■ 未来的电力公司

- 出路在哪里？
 - 改变盈利模式
 - 提供增值服务
 - 做大蛋糕 — 电动汽车？



小结

电力系统的基本特征

电力系统的定义和基本特征是什么？

发、输、配、用

当前电力系统的基本特征是什么？

为什么当前的电力系统以交流为主？

从发、输、配、用看历史背后的必然

交流输电的弊端（约束）有哪些？

同步约束

频率约束

电压约束

从新型电力系统的发展看未来电力系统形态的演变趋势。

为什么要三相传输？

线电压、相电压对称

为什么中国需要大功率远距离输电？

资源禀赋

为什么世界范围内的电网都具有一定规模（是互联的）？

互联的优势

中国互联电网的结构是什么？

分层分级调度