

# 第1讲 电力系统概述

#电力系统分析

## 1. 什么是电力系统

### ✍ 要点

理解系统与元件之间的关系

### 系统的定义（系统论的观点）

由相互作用、依赖的若干部分组成的具有特定功能的有机整体

### 电力系统把什么组织在一起？

电力元件：发电机、变压器、电力线路、负荷等电力设备

### 电力系统完成什么功能？

完成电能生产、输送、分配、消费

## 2. 电力系统的组成

### ✍ 要点

理解一次系统与二次系统的关联。本课程重点关注一次系统

### 一次系统

- 高压设备组成，*满足物理定律*
- 基本组成部分

- **源**——电能生产，完成一次能源到二次能源
- **网**——电能输送与分配，包括输电网与配电网
- **荷**——电能消费，电能转化为其他能量形式
- **储**——电能存储，形式多样，日益重要
- 使用单线图表达
  - 注意是**单线图**，而非单相图

## 二次系统

支撑一次系统运行的信息系统与操作机构

- 低压控制高压
- 弱电控制强电
- 信息流控制能量流

## 3. 电力系统运行

### 要点

明晰电力系统运行的特点和要求，理解为何电力是一种**特殊**商品？

## 电力系统运行的特点

- **密切性**：生产生活必需
- **短促性**：暂态过程极快
- **同时性**：功率实时平衡
  - 思考：**为何随着新型电力系统建设，储能变得原来越重要？**

## 电力系统运行的要求

- 安全——可靠供电
- 优质——电能质量
- 经济——运行成本
- 环保——节能减排

## 4. 互联电力系统

### 要点

理解互联电力系统硬币的两面——优势与风险

### 为何要互联（优势）？

- **减少总装机容量**：地域广、可错峰
  - 理解什么是峰？谷？峰谷差？
- **减少备用容量**：同时故障和检修概率小
  - 理解为什么需要备用容量？
- **提高供电可靠性**：N-1相对量小，可相互支援
  - 理解什么是N-1？
- **经济运行能力强**：多类型发电大范围互济
  - 理解什么是经济运行？
- **运行效率高**：可安装大机组
  - 理解为什么小系统不能安装大机组？

### 互联电网的风险？

- 投资大
- 运行难度大
- 连锁蔓延风险高
- 故障电流大

---

## 5. 电网如何进行控制

### 我国的五级调度机制

国调-网调-省调-地调-县调

### 调度自动化系统

典型的二次系统

## 6.发电：电能如何产生

### ✍ 要点

了解电力系统中主要的发电形式、基本原理、主要优缺点

了解目前中国各种形式发电的基本构成

## 火力发电

基本过程：化学能 -> 热能 -> 机械能 -> 电能

### 基本组成

- 燃料系统
  - 对象：煤
  - 烧煤，把汽水系统中的水变成水蒸汽；
  - 煤斗进煤，磨煤机磨成粉末，预热空气吹入锅炉进行燃烧；废物经过烟囱排出；
- 汽水系统
  - 对象：水
  - 水泵把冷水送进锅炉，被烧成高温高压的水蒸汽，送入汽轮机，推动汽轮机旋转，带动发电机转动，最终发出电能，送到电力系统中。
  - 水循环利用，进入冷却塔，热水变冷水，再送入水泵，进入循环。
- 电力系统
  - 发出电，经过开关、升压变压器，接入大电网

### 重点理解

- 我们常说的惯量在哪里？
- 我们如果想控制发出的电的功率大小，可以控制哪？怎么控制？
- 为什么火电机组调节相对较慢、不能频繁起停？

### 主要问题

- 安全问题
- 社会问题
- 环境问题
- 效率问题

## 水力发电

基本过程：势能 -> 水动能 -> 机械能 -> 电能

### 基本组成

- 水库
- 水轮机
- 电力系统

### 优点

- 洁净
- 廉价
- 可再生
- 综合性（发电、防洪、灌溉、航运）
- 调节性能好
- 抽水蓄能——特殊水电

### 缺点

- 建设难度大、投资大、附加问题多
  - 运行难度需要考虑的综合因素多
- 

## 核能发电

基本过程：核能 -> 热能 -> 机械能 -> 电能

### 基本组成

- 反应堆
- 汽水系统（为何常建在海边？或者河边？）
- 电力系统

## 优点

- 大量节省燃料，避免燃料运输
- 无须空气助燃
- 发电成本低、规模越大越划算

## 缺点

- 造价高
- 放射性污染的忧虑

---

## 发展中的新能源发电

- 风电、光伏装机比重已经超过水电和核电之和，每年新增装机一半以上是新能源发电
- 未来新型电力系统的主体力量，需解决的问题很多

---

## 电网：电能如何传输

### 要点

主要关注输电网的组成，理解电力网络不同接线方式，了解额定电压等级的确定原则

## 电网包含的主要设备

- 除去发电机与负荷的子系统（本课程主要关注输电网）
- 输电线路、变电站设备（变压器、开关、母线等）

## 电力网络的接线方式

### 接线图

- 电气接线图
- 地理接线图

## 两种接线方式

- 开式 - 从一个方向获取电能
- 闭式 - 从多个方向获取电能

思考：为何闭式网络可靠性更高？

## 电压等级

### 远距离输电为何使用高电压？

- 容量不变： $S = U * I$   $U \uparrow$  则  $I \downarrow$ 
  - 高电压 -> 低压降  $\Delta V = I * Z$
  - 高电压 -> 低损耗  $P_L = I^2 * R$
- 高电压 -> 高稳定性 (动态部分)
- 通过交流变压器，能将电压提高并输送至远距离，这是最早交流系统战胜直流系统的重要原因

### 电压等级与容量、距离的关系

分类	电压等级(kV)	输送容量(MVA)	输送距离	
输电	1000	2300-5000	1000以上	
	750	2000-2500	500以上（跨大区）	
	500	1000-1500	150-850(跨省)	
	220	100-500	100-300(跨地区)	
高中压配电	110（部分输电）	10-50	500-100（跨县市）	
	35	2-10	20-50(县市内)	
	10	0.2-2	6-20(市内)	

### 额定电压的确定

- 为何要确定额定电压？
  - 标准化
  - 获取最佳技术经济性能
- 系统额定电压与设备额定电压
  - 系统额定电压就是线路的额定电压，参见上表中的定义

- 设备额定电压是指接入系统的电力设备的额定电压（**出厂时按什么设计**）。
  - 主要是发电机、变压器（一次侧、二次侧）
  - 要考虑功率传输引起的电压降，留出裕度
- 基本原则
  - 末端电压要控制在5%偏差以内，保护终端用户电压不低于  $0.95U_N$ 。
  - 一个设备，如果是**功率输入**，取额定电压 $1.0U_N$ ；如果是**功率输出（相当于电源）**，考虑电压降落，取 $1.05U_N$ ，以保证到了末端也不低于  $0.95U_N$ （一般长线我们认为压降是10%）
  - 按照上述原则，变压器一次侧作为功率输入，取额定电压 $1.0U_N$ ，二次侧作为功率输出，取 $1.05U_N$ ，但有以下**特殊情况**
    - 升压变压器（一般接在发电侧）
      - **一次侧如果接发电机**，那么跟着发电机确定额定电压，（相当于电源侧），取 $1.05U_N$
      - **二次侧带负载后**，电压可能还要多下降5%，要再打出富余，取 $1.1U_N$
    - 降压变压器（一般接在负荷侧）
      - 一次侧按照正常原则，作为功率输入端，取额定电压 $1.0U_N$
      - 二次侧主要看与用电设备之间的距离，如果距离近，压降小，就按照原则选 $1.05U_N$ ，如果变压器本身漏抗大，在留出5%富余，此时取 $1.1U_N$

## 功率与复功率

### ✍ 要点

有功、无功的定义

复功率的定义（电力系统中最重要概念）

## 电力系统分析为何使用功率

- 电力系统本质上是一个能量系统，更适合使用基于能量的分析方法
- 电力系统运行与分析时，给定的边界条件是发电和负荷的功率，而非电流
- 发电和负荷都以功率和能量计量，便于结算

## 单相瞬时功率

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

其中



$$u(t) = \sqrt{2}U \cos \omega t$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \phi)$$

注意此处的  $p, u, i$  都是小写，都是时间  $t$  的函数，表示是瞬时功率，随时间而变化。

思考：

- $p(t)$  的函数图像是什么？频率（周期）是多少？
- 这个图像中，有一部分是小于0的（表示网络向外回馈了功率），作为一个无源网络，怎么会向外发出功率？能量从何而来？

为了更好分析，我们可以将电流  $i(t)$  分解成两个分量：

- $i_R(t) = \sqrt{2}I \cos \phi \cos \omega t$  和电压  $u(t)$  同相位，相当于是作用在 **电阻** 上产生的电流，后面对应有功，我们称之为 **有功分量**
- $i_X(t) = \sqrt{2}I \sin \phi \cos(\omega t - 90^\circ)$  落后电压  $u(t)$   $90^\circ$ ，相当于是作用在 **电感** 上产生的电流，后面对应无功，我们称之为 **无功分量**

## 有功的定义

$$u(t) = \sqrt{2}U \cos \omega t$$

$$i_R(t) = \sqrt{2}I \cos \phi \cos \omega t$$

$$\text{可得瞬时有功分量 } p_R(t) = u(t) \cdot i_R(t) = UI \cos \phi (1 + \cos 2\omega t)$$

注意： $p_R(t)$  仍然是一个瞬时功率，随着时间而变化，频率是  $2\omega$ ，**始终大于0**，**均值是  $UI \cos \phi$**  一个始终时变的函数，用起来很不方便，我们能不能选择一个**关键量**作为  $p_R(t)$  的**核心特征**？

**有功功率  $P$  定义为瞬时有功分量  $p_R(t)$  的均值  $P = UI \cos \phi$**

此处的  $P$  是大写的，不随时间  $t$  而交变，而是从时变瞬时功率  $p_R(t)$  提取出来的**特征量**，其物理意义是无源网络消耗的功率**均值**

## 无功的定义

$$u(t) = \sqrt{2}U \cos \omega t$$

$$i_X(t) = \sqrt{2}I \sin \phi \cos(\omega t - 90^\circ)$$

$$\text{可得瞬时无功分量 } p_X(t) = u(t) \cdot i_X(t) = UI \sin \phi \sin 2\omega t$$

注意： $p_X(t)$  仍然是一个瞬时功率，随着时间而变化，频率是  $2\omega$ ，**均值是0**，**峰值是  $UI \sin \phi$**  一个始终时变的函数，用起来很不方便，我们能不能选择一个**关键量**作为  $p_X(t)$  的**核心特征**？（思考：还能用均值么？如果不能，选啥？）

**无功功率  $Q$  定义为瞬时无功分量  $p_X(t)$  的峰值  $Q = UI \sin \phi$**

此处的 $Q$ 是大写的，不随时间 $t$ 而交变，而是从时变瞬时功率 $p_X(t)$ 提取出来的特征量，其物理意义是无源网络与外界交换能量的能力大小

## 无功的价值（无功=无用功么？）

- 电网的设备和负载中都包含了电感（或电容）等储能元素，所以在交变电压的作用下，瞬时功率中一定有无功分量存在
- 这说明输送有功的同时，一定伴随着无功。既然无功没有真的做功，那么它干了什么？
- 思考：交流系统能够正常运行的基础是什么？必须要建立和维持一个支撑系统运行的磁场，而无功的价值就在于通过能量的不停交换，构建起这样一个磁场！

注意区分感性无功和容性无功

## 复功率

视在功率 $S$ 定义为 $u(t)$ 与 $i(t)$ 的有效值之积

$$S = UI$$

视在功率 $S$ 用来表征设备的容量，注意，这里是大写的 $S$ ，它不是时间的函数，也不满足功率守恒（不同设备之间的视在功率不能直接加减）

现在我们有

$$S = UI$$

$$P = UI \cos \phi$$

$$Q = UI \sin \phi$$

所以，我们可以构建起一个三角形，也就是极为重要的功率三角形  
而有了功率三角形，我们就能够定义出一个复数 $\dot{S}$ ，即复功率

$$\begin{aligned}\dot{S} &= \dot{U} \cdot \hat{I} \\ &= UI \angle \phi \\ &= UI \cos \phi + jUI \sin \phi \\ &= P + jQ\end{aligned}$$

注意， $u(t)$ 和 $i(t)$ 都是交流瞬时量，为了方便计算，我们在电路中可以引入相量 $\dot{U}$ 和 $\hat{I}$ 去描述，我们通过这两个相量的相乘（注意 $\hat{I}$ 要取共轭），计算得到了一个新的复数 $\dot{S}$ ，严格讲它不是一个相量，不对应一个在时间维度上交变的正弦量，但是这个复数一下子把和功率相关的所有关键特征都涵盖了！@\_@

$\dot{S}$ 为何重要？

- 实部是有功功率 $P$
- 虚部是无功功率 $Q$

- 幅角是功率因数角 $\phi$
- 模是视在功率 $S$

我们在电路计算中，已经熟悉了使用相量法进行求解，而现在我们发现，虽然  $P$  和  $Q$  都不是相量，但是它们俩分别作为实部和虚部得到的复功率 $\dot{S}$ ，却可以**直接基于电压相量 $\dot{U}$ 和电流相量 $\dot{I}$ 将其求解出来**，这极大的方便了我们计算。

注意：复功率 $\dot{S}$ 可以相加，但是视在功率 $S$ （只是其模值）不能直接相加。

## 扩展到三相

$$\begin{aligned} p(t) &= u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) \\ &= P = 3P_P \\ &= 3U_P I_P \cos \phi \end{aligned}$$

从三相看过去，三相总加在一起的瞬时功率不再是一个交变的曲线，**而是一个常数，数值上刚好等于每一相的有功功率 $P_P$ 之和**（此处的下标P表示Phase，说明是相分量），我们将这个常数定义为三相有功功率

$$P = 3U_P I_P \cos \phi$$

这说明什么？

- 对于对称的三相平衡系统，最后与外部交互的瞬时功率是平稳的，这也正是三相供电系统的一个好处。

为了与单相保持一致，我们定义一个三相无功

$$Q = 3U_P I_P \sin \phi$$

从物理意义上如何看待？

- 和单相系统不同，这个平衡三相系统和外部没有发生能量的往复交换，那么这种能量交换是不存在么？
- 这种能量交换依然在发生，只不过是在三相系统内部，三相之间相互交换。每一相看过去，它的能量交换能力是（按照前面单相定义） $U_P I_P \sin \phi$ ，因此，三相的总能力就是  $3U_P I_P \sin \phi$

同样的，我们定义三相视在功率

$$S = 3S_P = 3U_P I_P$$

那么  $S$   $P$   $Q$  之间依然满足功率三角形，所以我们定义**三相复功率**

$$\dot{S} = 3\dot{U}_P\dot{I}_P$$

也可以使用线电压、线电流表示，但注意无论是Y接法还是Δ接法， $\phi$ 仍然是每一相的功率因数角

## 负荷：电能使用与消耗

自学为主，重点掌握：

- 负荷曲线具有什么特点？
- 电力系统运行时，为什么要预测负荷？

## 负荷包括什么

- 电力系统负荷是电力用户所需要的电功率总和，也成电力系统的综合用电负荷
- 本课程中关注的是高压输电系统负荷，本质上是很多特性各异的负荷汇聚在一起的“聚集”特性

## 负荷损耗

电能从发电侧送到用户侧，会有能量损失

- 厂用电
- 网络损耗

## 负荷曲线

在稳态分析中，我们一般使用负荷曲线。负荷曲线是指一段时间内负荷随时间变化的曲线，可用于预测负荷趋势

- 有功、无功
- 日、周、旬、月、年
- 发电厂、变电所、线路、用户

理解负荷曲线的基本形状、关键特征、主要用途

## 自学与思考

1. 为什么我们要预测负荷曲线？

2. 负荷曲线为什么能够预测？
3. 负荷曲线长什么样子？
4. 电网希望负荷曲线长什么样子？（“友好”？）
5. 有办法改变负荷曲线么？