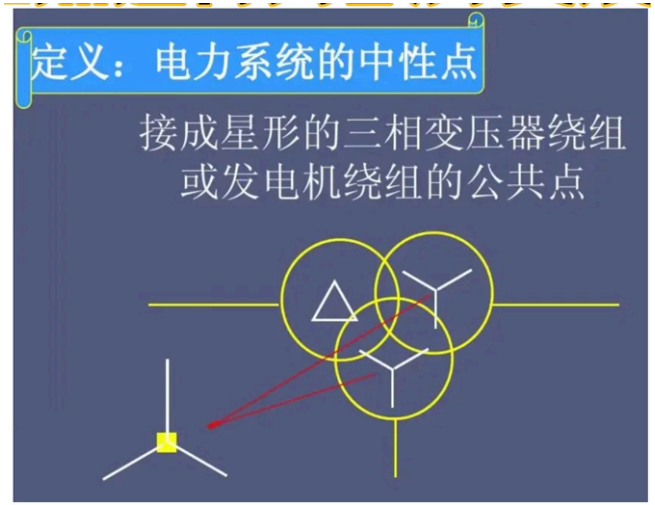
七、电力系统中性点的运行方式

电力系统中变压器、发电机的中性点与大地之间的连接方式，涉及电力系统多个方面，对电力系统的设计和运行有多方面影响。

以系统零序电抗与正序电抗的比值划分 $\begin{cases} X_0 / X_1 \le 3, & \text{直接接地} \\ X_0 / X_1 > 3, & \text{非直接接地} \end{cases}$

项目	接地方式					
	不接地	实接地（单点）	实接地（多点）	低阻抗接地	高阻抗接地	谐振接地（消弧线圈接地）
使用国家	Italy, Japan, Ireland, Russia Peru, Spain China	Great Britain	USA, Canada Australia Latin America	France Spain		Northern and Eastern Europe, China Israel
负荷连接	Ph-Ph	Ph-Ph, Ph-N	Ph-Ph, Ph-G	Ph-Ph	Ph-Ph	Ph-Ph
过渡过程电压	Bad(4-4.5U_p)	Good	Good	Good	Good(R-Grd) Bad(L-Grd)	Average(<4U_p)
相地故障运行	Not Always	No	No	No	Not Always	Almost Always
人身安全	Average	Good	Bad	Good	Average	Good
故障后供用电设备热效应	Low	High	High	High	Low	Lowest
通讯干扰	Average	High	High	High	Low	Lowest
接地保护灵敏度	Average	Good	Bad	Good	Average	Average



1）电力系统中性点是什么？

发电机、变压器星形接线中性点



中性点有效接地（直接接地）

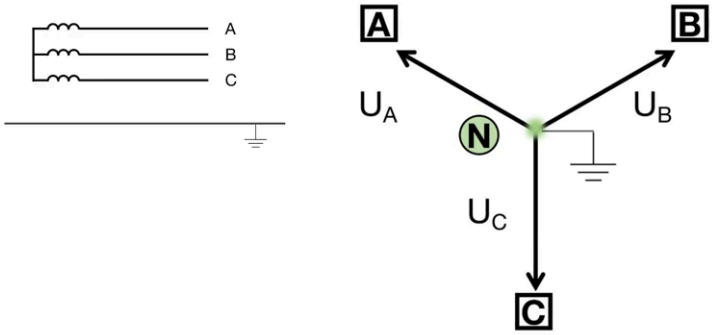
中性点非有效接地（不直接接地）：低阻、高阻、谐振

故障类型有哪些？

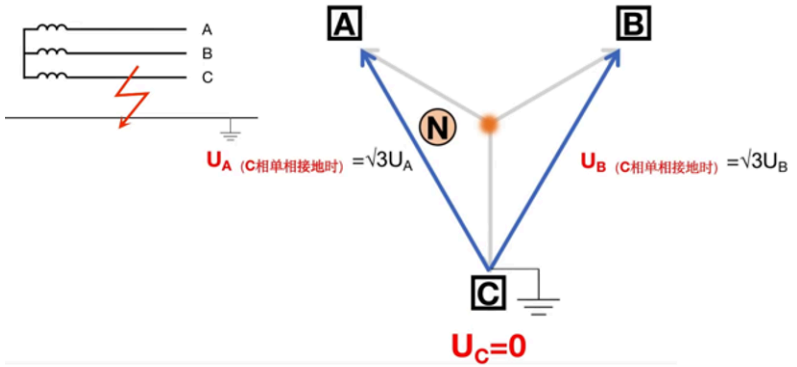


雨课堂 Rain Classroom

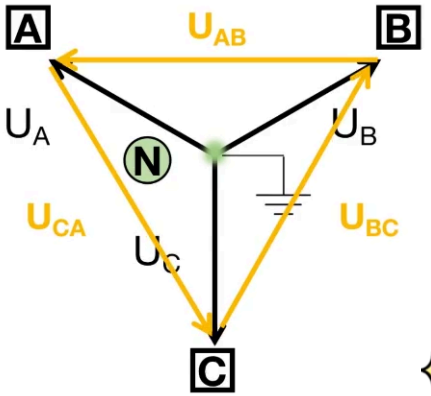
中性点不接地系统



中性点电压升高为相电压！



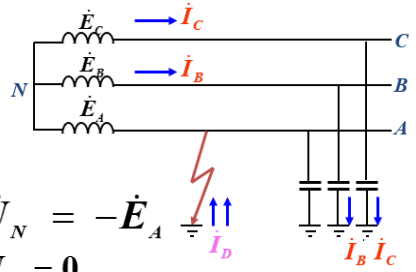
画图体会，线电压不变！

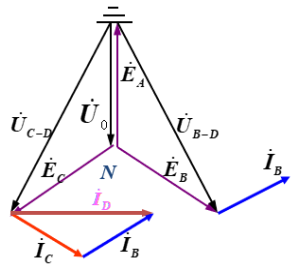


重点

中性点不接地系统发生单相接地故障，允许继续对外供电，线电压不变。

不构成回路，故障电流很小！被称为小电流接地系统





$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A$$

$$\dot{U}_A = 0$$

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{E}_A = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{-j150^\circ} \quad \dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{j150^\circ}$$

- 小接地电流系统：当发生单相接地故障时，故障电流很小。
- 中性点对地电位：上升到相电压，相位相反
- 三相对地电压：非故障相对地电压升高到相电压的根号3倍，即等于线电压
- 线电压：仍保持对称和大小不变

雨课堂 Rain Classroom

2.4 中性点非直接接地系统中单相接地故障的保护
(Protection System for Single Phase Earth Fault in the Neutral Indirectly Earth Systems)

中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、中性点经电阻接地等系统，统称为中性点非直接接地系统。在中性点非直接接地系统（又称小接地电流系统）中发生单相接地时，由于故障点电流很小，而且三相之间的线电压仍然保持对称，对负荷的供电没有影响，因此，在一般情况下都允许再继续运行1～2h。在此期间，其他两相的对地电压要升高$\sqrt{3}$倍，为了防止故障进一步扩大造成两点或多点接地短路，就应及时发出信号，以便运行人员查找发生接地的线路，采取措施予以消除。这也是采用中性点非直接接地运行的主要优点。

1.故障电流比较小

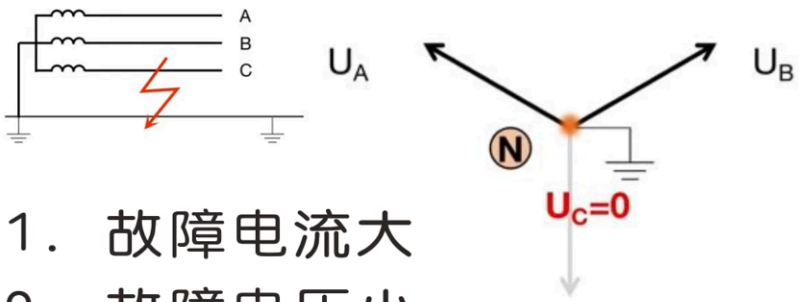
2.非接地相对地电压上升为相电压√3倍

3.中性点电位上升为相电压

4.线电压不变，允许继续供电

适合低电压系统（电流大、电压小）！

中性点直接接地



1. 故障电流大
2. 故障电压小

适用于高电压系统！

中性点接地方式比较

中性点接地方式	中性点直接接地系统	中性点不接地系统
别称	大电流接地系统	小电流接地系统
可靠性比较	可靠性低	可靠性高
故障电流与电压	故障电流大	故障电压高
适用电压等级	高	低

3.1.1 中性点有效接地方式应符合下列规定：

1 110kV～750kV系统中性点应采用有效接地方式。在各种条件下系统的零序与正序电抗之比(X_0/X_1)应为正值并且不应大于3，而其零序电阻与正序电抗之比(R_0/X_1)不应大于1；

2 110kV及220kV系统中变压器中性点可直接接地；部分变压器中性点也可采用不接地方式；

3 330kV～750kV系统变压器中性点应直接接地或经低阻抗接地。

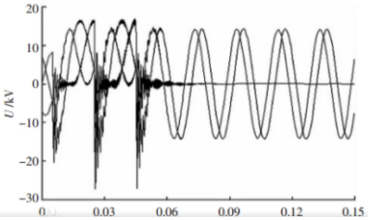
雨课堂 Rain Classroom

中性点不直接接地，故障电流小有什么问题？

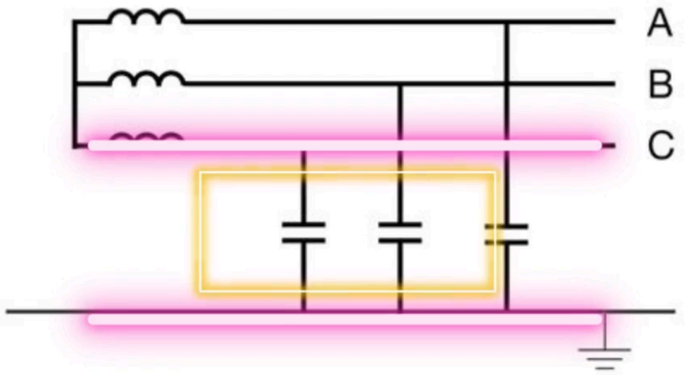
2.0.2 为限制瞬态过电压，系统等值零序电阻不宜小于 2 倍系统等值零序感抗。中性点低电阻接地的系统可获得快速选择性继电保护所需的足够电流。 **小电阻接地采集零序电流**

高小电阻接地——限制电弧，较少使用

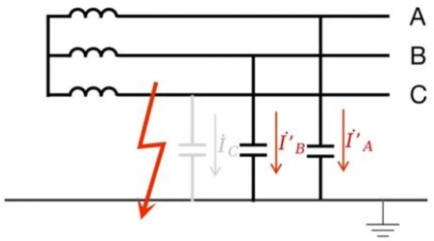
《10kV系统3次重燃、2次工频熄弧的系统三相电压波形

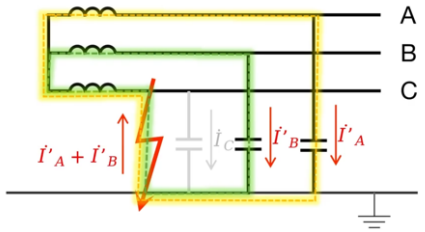


经消弧线圈接地，首先简要理解输电线路模型



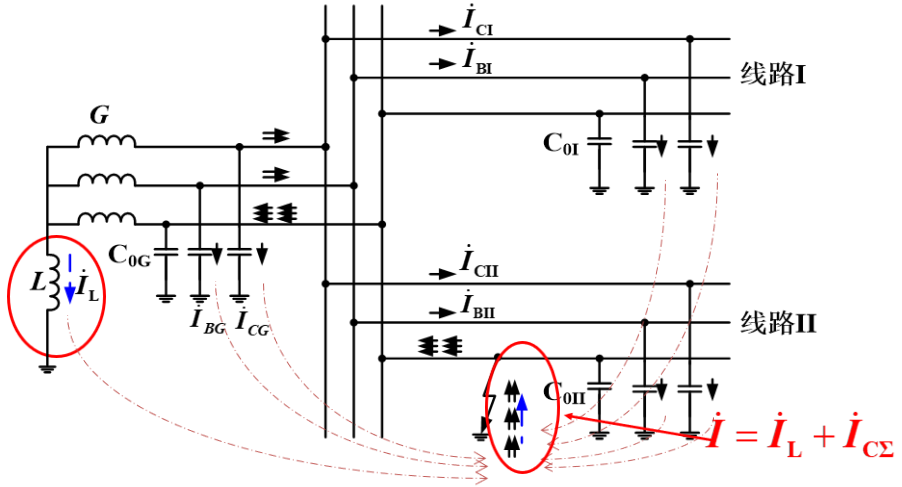
对地电容电流——》接地电容电流





IA、IB、IC之和不再为零　　**并联的电容电流会产生汇集效应**

中性点经消弧线圈接地



- 利用消弧线圈电感电流对接地电容电流进行补偿，使通过故障点电流减小到能自行熄弧。属于小接地电流系统

雨课堂 Rain Classroom

- **过补偿（电感电流>电容电流）**
- 欠补偿（电感电流<电容电流）
- 完全补偿（相等）

中性点经消弧线圈接地的适用场合

- **单相接地故障点总电容电流超过下列数值时，必须尽快安装消弧线圈：**
  - **3kV～6kV电网，故障点总电容电流超过30A**
  - **10kV电网，故障点总电容电流超过20A**
  - **22kV～66kV，故障点总电容电流超过10A**

补充：电力系统的主接线

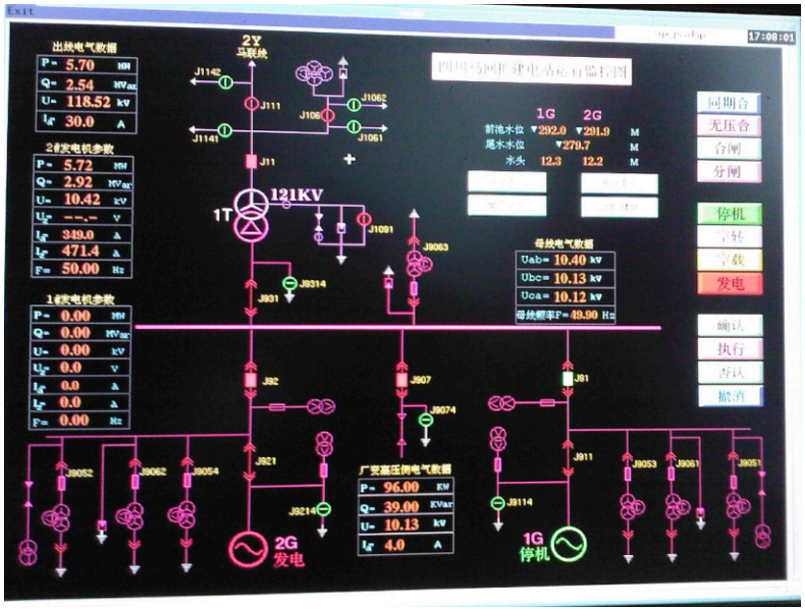
- **电气主接线是电力设计、运行、检修部门以及有关技术人员必须深入掌握的主要内容。**
- **电气主接线图：用国家规定的电气设备图形与文字符号，详细表示电气主接线组成的电路图。电气主接线图一般用单线图表示(即用单相接线表示三相系统)，但对三相接线不完全相同的局部图面 (如各相中电流互感器的配置)则应画成三线图。**

- **电气主接线：也称为电气主系统或电气一次接线。它是由电气一次设备按电力生产的顺序和功能要求连接而成的接受和分配电能的电路，是发电厂、变电所电气部分的主体，也是电力系统网络的重要组成部分。**

- **电气主接线反映了：**

1)发电机、变压器、线路、断路器和隔离开关等有关电气设备的数量。

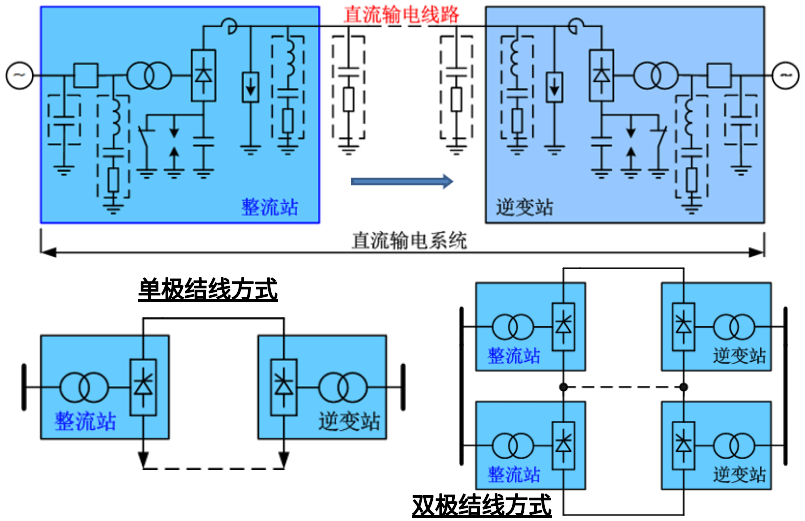
2)各回路中电气设备的连接关系。





八、直流输电（HVDC）与柔性交流输电（FACTS）

1，直流输电(HVDC)



直流输电的优点：

1）直流线路造价低；

2）直流线路沿线电压分布平稳，线路损耗低；

3）直流输电所连两个交流系统不存在同步稳定性问题，输电容量与输电距离不受同步稳定性限制；

4）直流输电系统功率潮流调节迅速；

5）双极结线时，若一极故障仍可输送50%的功率；

6）直流联网可避免电磁环网引起的线损增大。

直流输电的缺点：

1）换流站造价高；

2）两侧换流站均需大量的无功补偿，约为输电功率的（40-60）%；

3）换流阀由功率半导体构成（SCR、IGBT），过载能力低；

4）单极输电（另一极为海水、大地）时，对沿途金属设施造成电化学腐蚀；

5）直流断路器技术难度大、灭弧困难。

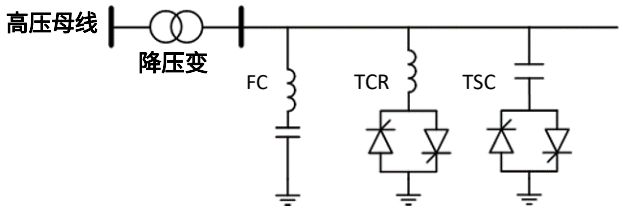
2，柔性交流输电(FACTS)

利用大功率电力电子元器件构成的装置来控制或调节交流电力系统的运行参数和/或网络参数，从而优化电力系统的运行状态，提高电力系统输电能力。

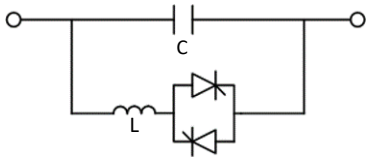
按技术成熟度分为三类：

第一类：技术成熟，已有大量实际工程应用

- 静止无功补偿器(SVC，Static Var Compensator)
- 晶闸管控制串联电容器(TCSC，Thyristor Controlled Series Capacitor)
- 静止同步补偿器(STATCOM，Static Synchronous Compensator)

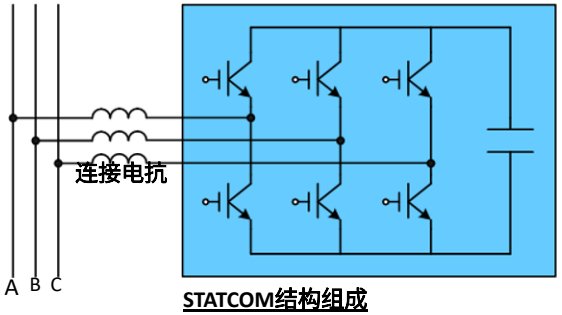


SVC结构组成(SVC=FC+TCR+TSC)



TCSC结构组成

TCSC由固定电容器与可控电抗器并联组成，串联于线路中，调节线路的等值阻抗，从而调节线路的输送功率。

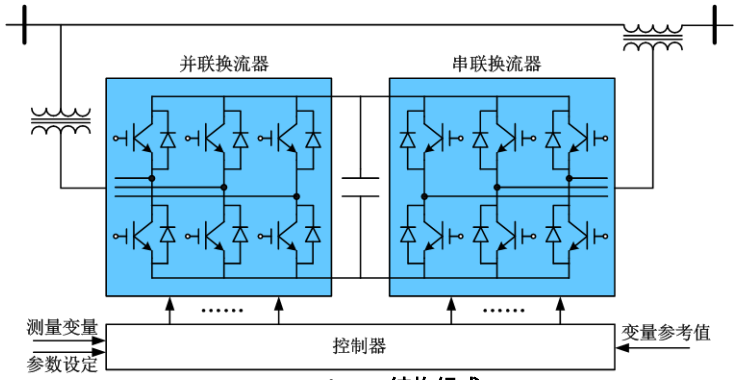


STATCOM结构组成

高压大容量STATCOM：多重化、多电平结构，链式结构为常用拓扑之一。

第二类：已有少量实际工程应用，仍处不断研究完善阶段

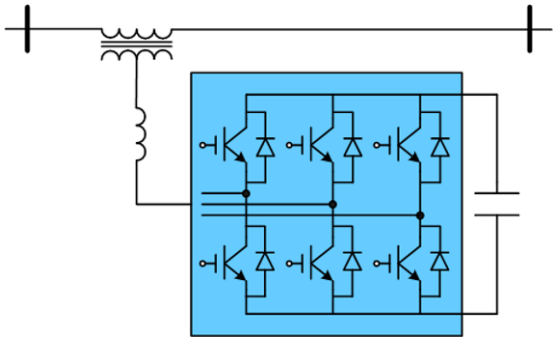
- 统一潮流控制器(UPFC，Unified Power Flow Contoller)
- 统一电能质量控制器(UPQC，Unified Power Quality Contoller)



UPFC/UPQC结构组成

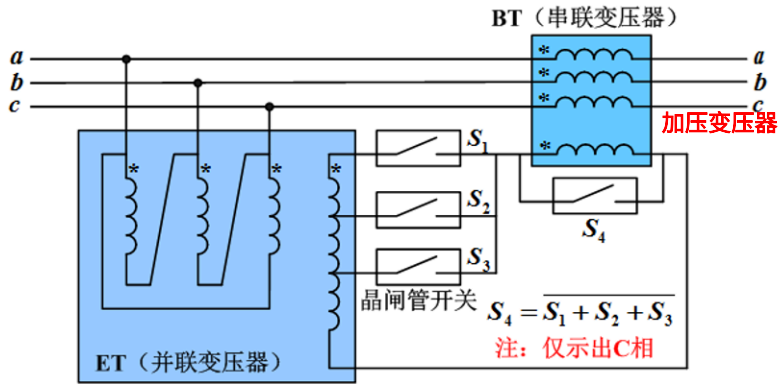
第三类：已有原理设计，尚无/极少实际工程应用

- 静止同步串联补偿器(SSSC，Static Synchronous Series Compensator)
- 晶闸管控制移相器(TCPST，Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer)



SSSC结构组成

雨课堂 Rain Classroom



激励变压器　　TCPST结构组成

1）激励变压器为 Δ/Y 接法，任一时刻　只能有一个开关（晶闸管反并联结构）导通，概念加压矢量大小，从而改变相位；

2）当 S_1、S_2、S_3 均为截止时，　导通 S_4 避免将加压变压器激磁电抗串入线路。

4. 补充概念

*额定频率：50Hz

*额定电压：交流1000kV 直流±1100kV

23 北京 1.我国特高压直流输电线路的最高电压等级为（　）
A. ±1100kV B.1100kV C. ±1000kV D.1000kV

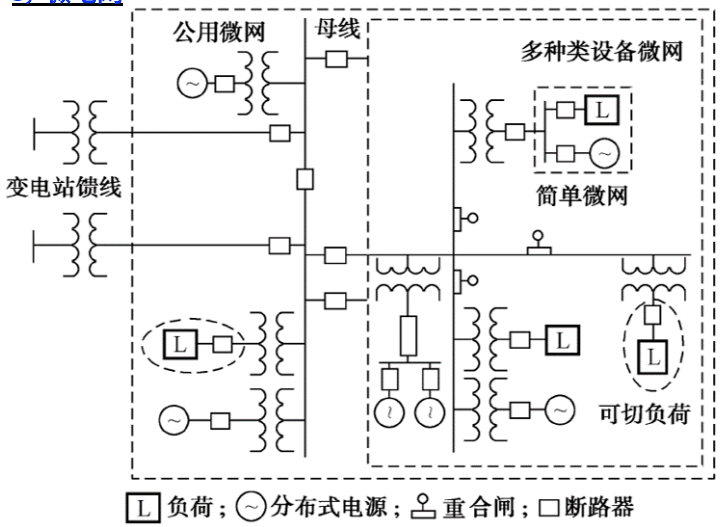
*总装机容量:该系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和。

*年发电量：该系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和。

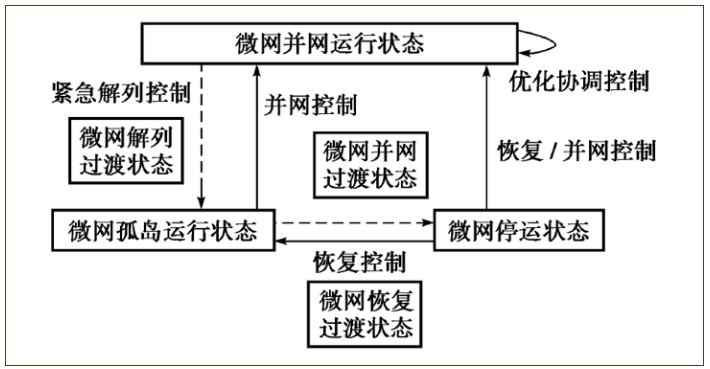
*最大负荷：规定时间，如一天、一月或一年内，电力系统总有功功率负荷的最大值。

九、微电网、智能电网与能源互联网

1，微电网

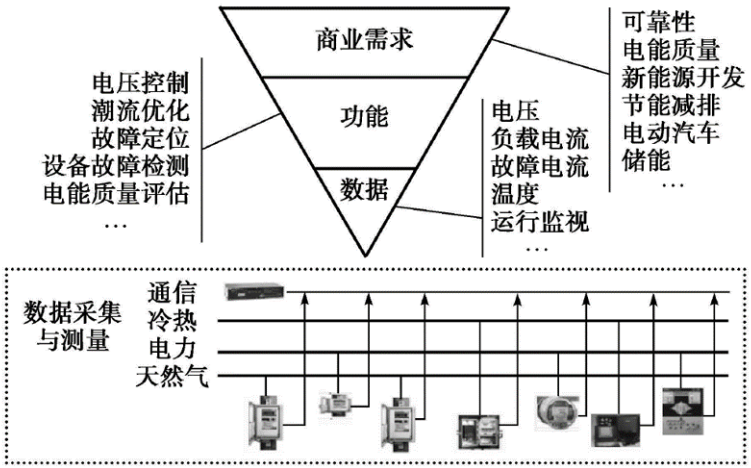


微电网是指由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统，是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统，既可以与外部电网并网运行，也可以孤立运行。



微电网运行状态

2，智能电网

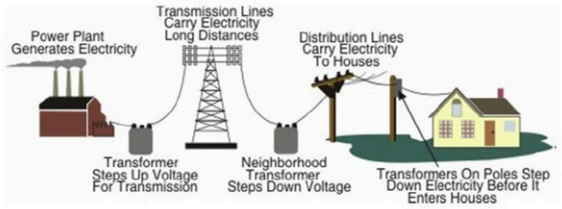


智能配电网的技术层次

智能电网的主要特征

- **坚强。**在电网发生大扰动和故障时，仍能保持对用户的供电能力，而不发生大面积停电事故；在自然灾害、极端气候条件下或外力破坏下仍能保证电网的安全运行；具有确保电力信息安全的能力。
- **自愈。**具有实时、在线和连续的安全评估和分析能力，强大的预警和预防控制能力，以及自动故障诊断、故障隔离和系统自我恢复的能力。
- **兼容。**支持可再生能源的有序、合理接入，适应分布式电源和微电网的接入，能够实现与用户的交互和高效互动，满足用户多样化的电力需求并提供对用户的增值服务。
- **经济。**支持电力市场运营和电力交易的有效开展，实现资源的优化配置，降低电网损耗，提高能源利用效率。
- **集成。**实现电网信息的高度集成和共享，采用统一的平台和模型，实现标准化、规范化和精益化管理。
- **优化。**优化资产的利用，降低投资成本和运行维护成本。

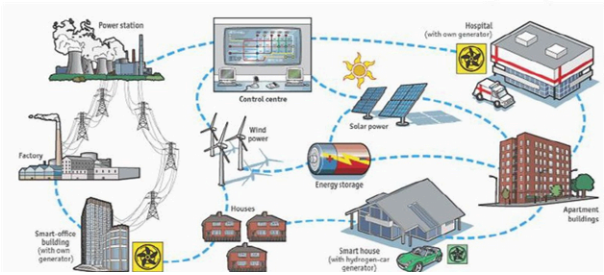
智能电网与传统电网的区别



传统电网：

1，单向潮流

2，简单交互



智能电网：

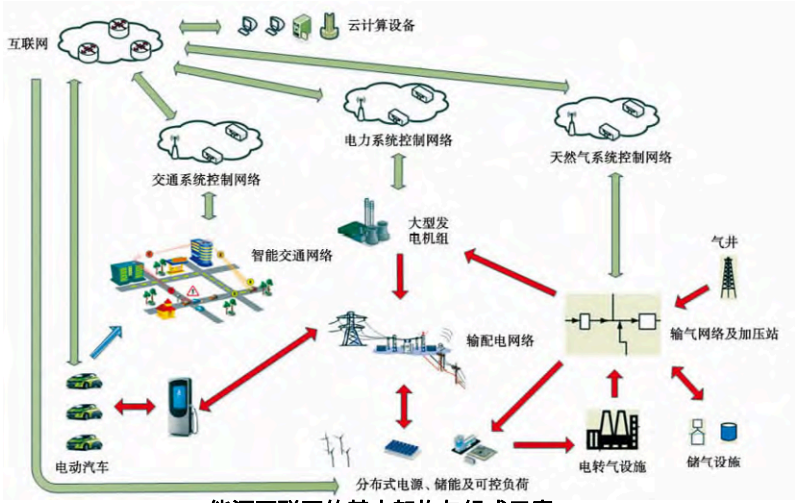
1，双向潮流

2，分布式电源

3，分布式储能

4，主动交互

3，能源互联网



能源互联网的基本架构与组成元素

雨课堂 Rain Classroom

能源互联网是以电力系统为核心，以互联网及其他前沿信息技术为基础，以分布式可再生能源为主要一次能源，与天然气网络、交通网络等其他系统紧密耦合而形成的复杂多网流系统。

全球能源互联网

全球能源互联网是以特高压电网为骨干网架、全球互联的坚强智能电网，是清洁能源在全球范围大规模开发、输送、使用的基础平台，实质就是 **“智能电网＋特高压电网＋清洁能源”**。智能电网是基础，特高压电网是关键，清洁能源是根本。



1.2 电力系统基本元件概述

一、发电机（同步发电机）

$n = 60f/p$，发电频率与同步发电机转速有严格对应关系

- 汽轮发电机：3000转/分，转速高，转子转动惯量小，卧式结构
- 水轮发电机：转速低，转子转动惯量大
- 直流励磁系统：通常用于中、小容量
- 可控硅交流励磁系统：大容量发电机

二、电力变压器（总容量为发电机装机容量的6—8倍）



按用途可分为：

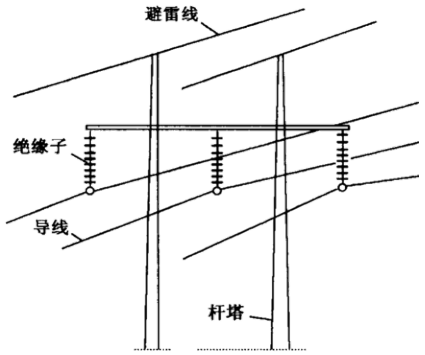
- 升压变压器
- 降压变压器
- 配电变压器
- 联络变压器

R10容量系列（按$\sqrt[20]{10}$倍率递增）：
1,1.25,1.6,2,2.5,3.2,4,5,6.3,8

- 按容量大小划分
  - $\leq 630KVA$，小型变压器
  - $800KVA-6300KVA$，中型变压器
  - $8000KVA-63000KVA$，大型变压器
  - $\geq 80000KVA$，特大型变压器
- 按相数划分
  - 单相变压器：大容量时考虑生产、运输等问题
  - 三相变压器
- 按绕组数划分
  - 双绕组变压器：连接两个不同电压等级
  - 三绕组变压器：连接三个不同电压等级
- 按耦合方式划分
  - 普通变压器
  - 自耦变压器
- 按冷却方式划分
  - 干式变压器
  - 油浸式变压器

三、电力线路

1，架空线路



架空线路由导线、避雷线（架空地线）、杆塔、绝缘子和金具等元件组成。

杆塔：支持导线和避雷线；
避雷线：又称架空地线，将雷击过电流引入大地；
绝缘子：导线与杆塔绝缘；
金具：支持、接续、保护导线与避雷线，联结和保护绝缘子；

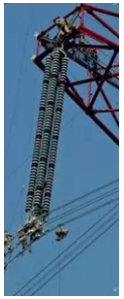
导线：架空线路的主要组成元件，是电能传输的主要载体。为了提高输电线路传送功率，常使用分裂导线。

雨课堂 Rain Classroom



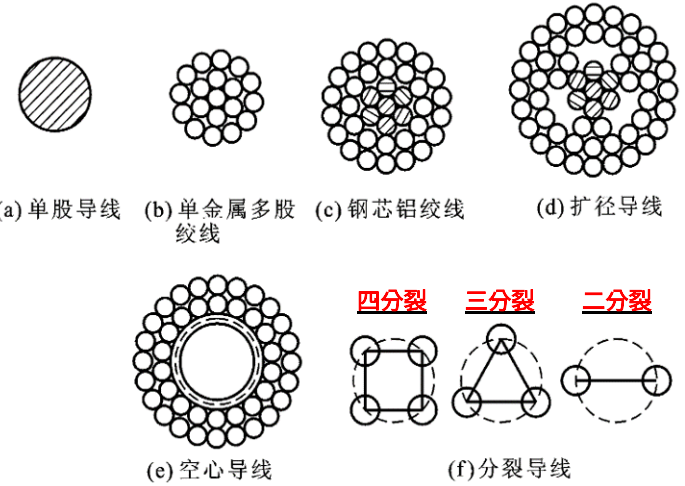






1000kV绝缘子

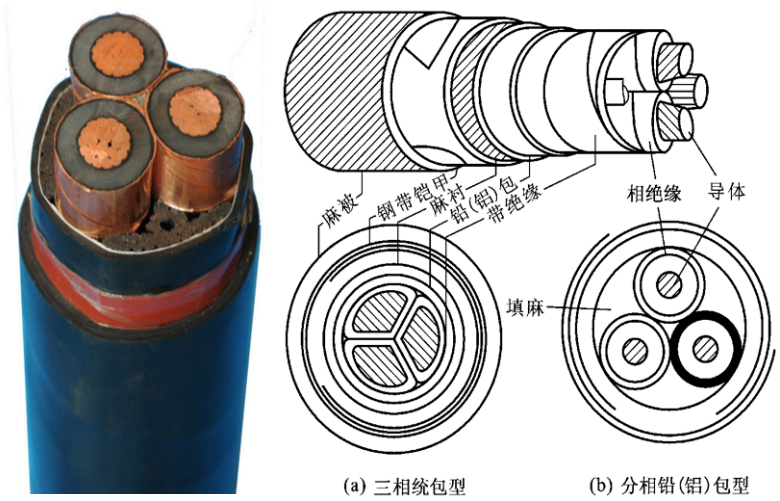
常用导线形式



(a) 单股导线 (b) 单金属多股绞线 (c) 钢芯铝绞线 (d) 扩径导线

(e) 空心导线 (f) 分裂导线

2，电缆线路

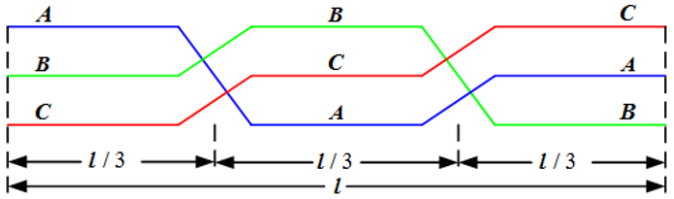


(a) 三相统包型 (b) 分相铅(铝)包型

3，杆塔和金具（参照教材）

导体换位：为了三相参数均衡采用导体换位消除导体位置引起的偏差，换位过程保证三相相序不变。

一次三相整体换位示意图



4，导线型号

LJ 铝绞线
LGJ 钢芯铝绞线
LGJQ 轻型钢芯铝绞线
LGJJ 加强型钢芯铝绞线

雨课堂 Rain Classroom

四、无功功率补偿设备

- 无功补偿设备
  - 同步调相机（SC）：空载发电机，调节励磁调节无功；
  - 电力电容器（FC）：超前补偿；
  - 静止补偿器
    - 饱和电抗器（SR）
    - 晶闸管控制电抗器（TCR）
    - 晶闸管投切电容器（TSC）
    - } SVC
    - 静止无功发生器（STATCOM/SVG）
    - 静止调相器（STATCON）

1.6 电力系统中的重要变量——功率

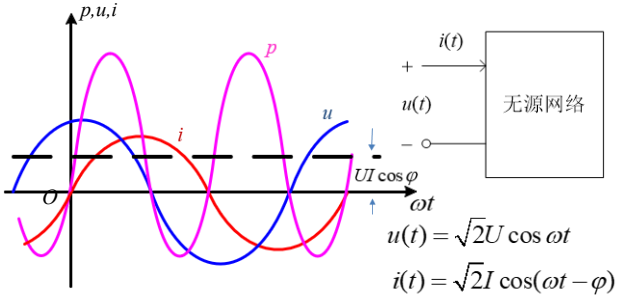
电力系统为何用功率作为变量？

- 实际系统中的电源、负荷常以功率形式给出，而电流是未知的，电力市场中以单位功率小时数(kWh)算钱。
- 有功功率和无功功率可以分别直接相加，它们的比例反映了功率因数，而单纯用电流不行。
- 从本质上说，电力系统是一个能量系统，采用基于能量的分析方法更能反映电力系统的本质。

1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

1.6 电力系统中的重要变量——功率

Q:单相瞬时功率是恒定值吗？



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

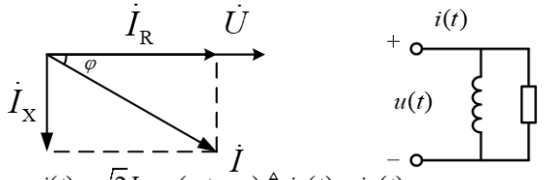
$$i(t)=\sqrt{2}I\cos(\omega t-\varphi)$$

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

1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

1.6 电力系统中的重要变量——功率

将电流和功率分解为有功分量和无功分量：



$$i(t)=\sqrt{2}I\cos(\omega t-\varphi)\triangleq i_R(t)+i_X(t)$$

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

$$i_X(t)=\sqrt{2}I\sin\varphi\cos(\omega t-\frac{\pi}{2})$$

$$p(t)=u(t)[i_R(t)+i_X(t)]=p_R(t)+p_X(t)$$

1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

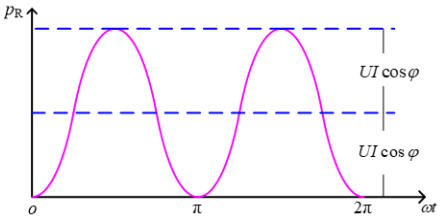
1.6 电力系统中的重要变量——功率

瞬时功率的有功分量：

有功分量：$p_R(t)=UI\cos\varphi(1+\cos 2\omega t)$

有功分量始终大于零，周期为$2\omega t$，平均值为 $UI\cos\varphi$。

其物理意义是无源网络中等效电阻的耗能速度。



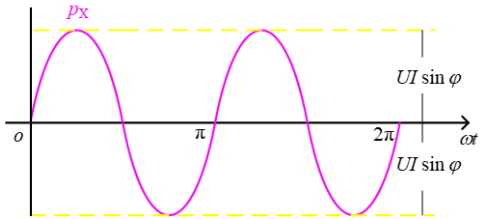
1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

1.6 电力系统中的重要变量——功率

瞬时功率的无功分量：

无功分量：$p_X(t)=UI\sin\varphi\sin 2\omega t$

无功分量的周期为$2\omega t$，平均值为零，峰值为 $UI\sin\varphi$，其物理意义是无源网络中等效电抗对外的换能速度。



1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

1.6 电力系统中的重要变量——功率

有功功率和无功功率涵义的小结：

- 有功功率*P*定义为瞬时有功功率的均值：

$$P=UI\cos\varphi$$

- 无功功率*Q*定义为瞬时无功功率的峰值：

$$Q=UI\sin\varphi$$

- *P*的物理意义：无源网络消耗功率的均值。
- *Q*的物理意义：无源网络与外界交换功率能力的大小，均值为零，实际并未消耗，对应于电感和电容的充放能。

1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

1.6 电力系统中的重要变量——功率

Q: 如何理解无功功率？无功功率是否等于无用功？

- 变压器、电动机等，它们都是依靠建立交变磁场才能进行能量的转换和传递（建立电感线圈中的磁链）。为建立交变磁场和感应磁通而需要的电功率称为无功功率。
- 有功功率和无功功率只是分工不同，但都不可或缺！之所以称为“无功”是因为能量没有被消耗，没有转换为其他形式。
- 无功功率不等于无用功！

1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

雨课堂 Rain Classroom

1.6 电力系统中的重要变量——功率

Q:无功不被消耗，还有无功负荷和无功电源的区分吗？

➢ 网络若是电感性的，则$Q>0$，习惯上认为网络“吸收”感性无功，是“无功负荷”。

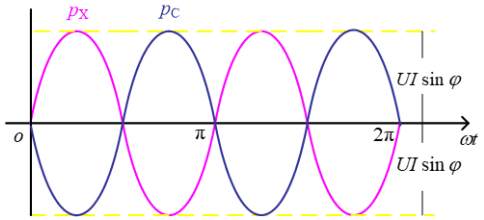
➢ 网络若是电容性的，则$Q<0$，习惯上认为网络“发出”感性无功，是“无功电源”。

➢ 这种“习惯”归根结底是因为电力系统中比重最大的负荷是异步电动机，变压器也是需要无功功率励磁，这些都是有“需求”的，都是“负荷”性质，都需要“无功电源”来“满足”。

1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

1.6 电力系统中的重要变量——功率

无功功率也遵守能量守恒：



➢ 负荷需要的感性无功p_X，需要容性的无功电源提供p_C来实时平衡。如果感性无功无法得到满足，会怎样？

1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

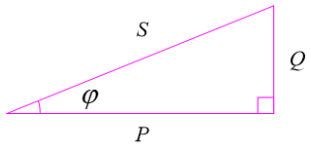
1.6 电力系统中的重要变量——功率

还记得复功率的概念吗？

➢ 视在功率S定义为$u(t)$和$i(t)$有效值的乘积：

$$S = UI$$

➢ 功率三角形：



$$S^2 = P^2 + Q^2$$

➢ 由功率三角形引入复功率的概念：

$$\dot{S} = \dot{U}\dot{I}^* = UI\angle\delta_u - \delta_i = UI\angle\varphi$$
$$= UI\cos\varphi + \mathrm{j}UI\sin\varphi = P + \mathrm{j}Q$$

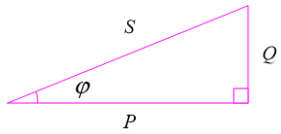
1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

1.6 电力系统中的重要变量——功率

采用复功率有哪些好处？

➢ 物理概念明确：功率三角形关系的复数形式

* 实部是有功功率P
* 虚部是无功功率Q
* 幅角是功率因数角φ
* 模是视在功率S



➢ 计算方便：复功率可以直接相加，视在功率不能直接相加。

1.1 电力系统的基本概念
1.2 电力系统的运行特点及基本要求
1.3 电力系统的额定参数
1.4 例题：电力系统额定电压确定
1.5 电力系统的接线
1.6 电力系统中的重要变量——功率
1.7 电力系统分析课程简介

五、平衡三相功率

观察现象
推导结论

- 定义：$p(t)=u_a(t)i_a(t)+u_b(t)i_b(t)+u_c(t)i_c(t)$
  $=P=3P_P=3U_PI_P\cos\varphi=C$（理解？）
- 为表示方便，定义三相无功：
  $Q=3Q_P=3U_PI_P\sin\varphi$ （事实？）
- 定义三相视在功率：
  $S=3S_P=3U_PI_P$
- 用线电压和线电流表示，对Y和△接法，均有：

$$\begin{cases} P=\sqrt{3}U_LI_L\cos\varphi \\ Q=\sqrt{3}U_LI_L\sin\varphi \\ S=\sqrt{3}U_LI_L \end{cases}$$

(φ仍是相电压和相电流夹角)

30

六、平衡三相复功率

- S、P、Q间仍组成功率三角形，因此引入：
  $\dot{S}=3\dot{U}_P\overset{*}{I}_P$
- 用线电压和线电流表示，对Y和△接法，均有

$$\begin{aligned}\dot{S}&=\sqrt{3}\dot{U}_L\overset{*}{I}_Le^{-j30^0}\ ?\\&=\sqrt{3}U_LI_L\angle\delta_{uL}-\delta_{iL}-30^0\\&=\sqrt{3}U_LI_L\angle\varphi\\&=\sqrt{3}U_LI_L\cos\varphi+j\sqrt{3}U_LI_L\sin\varphi\\&=P+jQ\end{aligned}$$

(φ仍是每相的功率因数角)