



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 2

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

第一章 新能源电力系统基本概念

1.1 新能源发电概述

理解能源结构和各种新能源的发电原理。

1.2 新能源发电的并网

掌握并网变换器的级联方式及拓扑结构。

1.3 含新能源发电的微电网和智能电网

掌握微电网、智能电网的基本概念。

1.4 新能源电力系统的特点

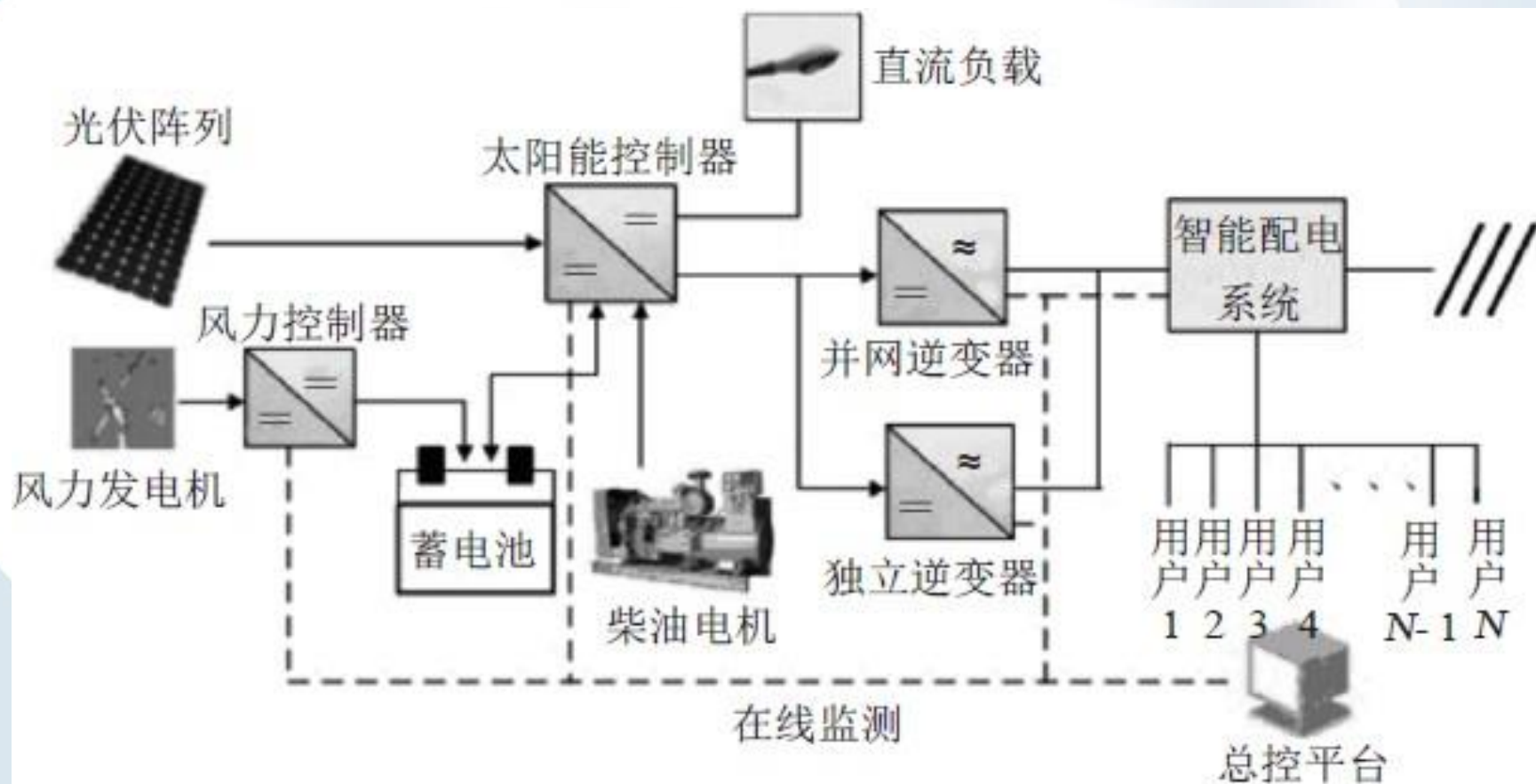
了解新能源发电并网对电力系统运行的影响。

1.3 含新能源发电的微电网和智能电网

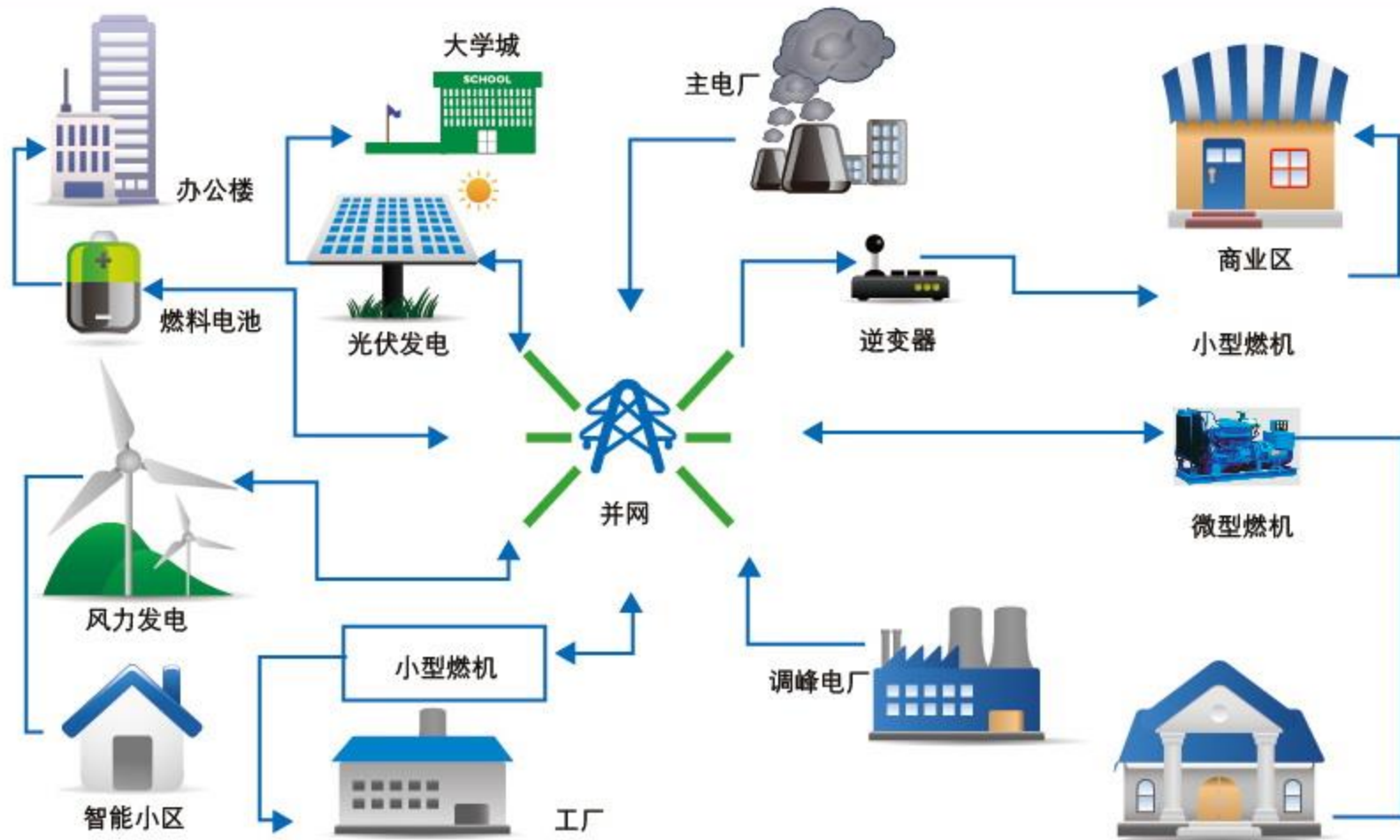
微电网、智能电网对大规模电力系统运行的意义：

- 新能源分散式、大规模集中式的并网，可能会给系统运行带来一定的负面影响。
- 而微电网、智能电网中DG的应用可以弥补大电网安全性稳定性的不足。
- 通过合理的规划和管理还可以提高电网的供电可靠性，降低电网的损耗。
- 相互独立运行、区域电力监控、快速控制、特殊场合等。

典型微电网



微电网与大电网



一、微电网 (Microgrid)

- 美国CERTS（美国电力可靠性技术解决方案协会）
 - CERTS定义微电网基本内涵：是一种**负荷和微电源的集合**。
 - 微电源在一个系统中**同时提供电力和热力**的方式运行；
 - 微电源中的大多数必须是电力电子型的，并**提供所要求的灵活性**，以确保能以一个集成系统运行；
 - 其控制的灵活性使微电网能作为大电力系统的一个受控单元，以**适应当地负荷对可靠性和安全性**的要求。

微电网基本概念

- 欧洲标准
 - 欧洲提出要充分利用分布式能源、智能技术、先进电力电子技术等实现集中供电与分布式发电的高效紧密结合，并积极鼓励社会各界广泛参与电力市场，共同推进电网发展。微电网以其智能性、能量利用多元化等特点也成为欧洲未来电网的重要组成。
 - 目前，欧洲已初步形成了微电网的运行、控制、保护、安全及通信等理论，并在实验室微电网平台上对这些理论进行了初步验证。

微电网基本概念

- 日本标准
 - 东京大学给出的定义：微电网是一种**由分布式电源组成的独立系统**，一般通过联络线与大系统相连，由于供电与需求的不平衡关系，微电网可选择**与主网之间互供或者独立运行**。
 - 三菱公司给出的定义：微电网是一种**包含电源和热能设备以及负荷的小型可控系统**，对外表现为一整体单元并可以接入主网运行；并且**将以传统电源供电的独立电力系统也归入为微电网研究范畴**，大大扩展了CERTS对微电网的定义范围。

微电网概念：归纳

- 微电网——是由各种分布式电源、储能单元、负荷以及监控和保护装置组成的集合。
 - 具有灵活的运行方式和可调度性能：并网运行 + 孤岛（自主）运行；
 - 通过控制装置间的协调配合，可同时向用户提供电能、热能等；
 - 系统容量一般为数千瓦至数兆瓦，通常接配电网。
- 对大电网来说，微电网可作为一个可控的“细胞”，是一个简单的可调度负荷；对用户来说，微电网可作为一个可定制的电网。

储能单元

- 物理类储能:

- 抽水蓄能(Pumped Storage)
- 飞轮储能(Flywheel)
- 压缩空气储能(Compressed air)
- 超导磁存储(Superconducting magnetic storage)
- 超级电容储能(Super Capacitor)
- 相变储能(Phase Change Material)

- 化学类储能:

- 各类蓄电池储能(Battery Energy Storage)
- 电动汽车(Electric Vehicle, EV)
- 燃料电池(Fuel Cell)、液流电池、电解水制氢等

储能装置均可兼作电源与负荷

- 微电网发展中仍存在的问题
 - 缺乏统一、规范的微电网体系技术标准和规范。
 - 电力电子技术在微电网中的应用水平不高。
 - 微电网的保护控制技术尚不成熟。
 - 投资及运行维护成本高(储能装置，峰谷电价政策，监控及能量管理系统)。

二、智能电网 (Smart Grid)

智能电网基本概念

- 1.美国定义
 - 美国能源部DOE: Grid 2030, 一个完全自动化的电力传输网络, 能够监视和控制每个用户和电网节点, 保证从电厂到终端用户整个输配电过程中所有节点之间的信息和电能的双向流动。
 - 美国电力研究院EPRI: IntelliGrid, 是一个由众多自动化的输电和配电系统构成的电力系统, 以协调、有效和可靠的方式实现所有的电网运作: 具有自愈功能; 快速响应电力市场和企业业务需求; 具有智能化的通信架构, 实现实时、安全和灵活的信息流, 为用户提供可靠、经济的电力服务。



Smart Grids

Currently it is still very difficult for consumers to see how much electricity they are using, but smart grid devices are quickly being developed. It is hoped that by being able to monitor how much electricity they are using, consumers will use less of it, subsequently cutting energy bills and, moreover, pinpointing off-peak hours to run their energy-intensive machines.

A Smart Grid will
systems by optimi
and maximiz
The harmonisation o
improve th

Optimizes Assets and Operates Efficiently

Variety of Generation Options

Variety of Generation Options

technologies, but this is the aim of the Smart Grid.

Demand Response

Consumers are changing what they need from a power energy, cheaper tion, all of which grid. The ed "smart" technologies and devices will allow users to have a more direct control over the energy they use on a day-to-day basis.

Demand Response

technologies and devices will allow users to have a more direct control over the energy they use on a day-to-day basis.

Accommodates all Storage Options

Acces
All sour
access a ge
Energy stora
and th

Self-healing

Automatically detects and responds to grid p
quick recovery after disturbances. The incorpora
also means that affected areas can be isolat
network as to cause minimal disruption to services

Electricity Market

Electricity Market

to local economies.

Power for 21st Century Needs

and consumer level

Alternative energy sources
of location,
so be a viable source of
to a good source of income

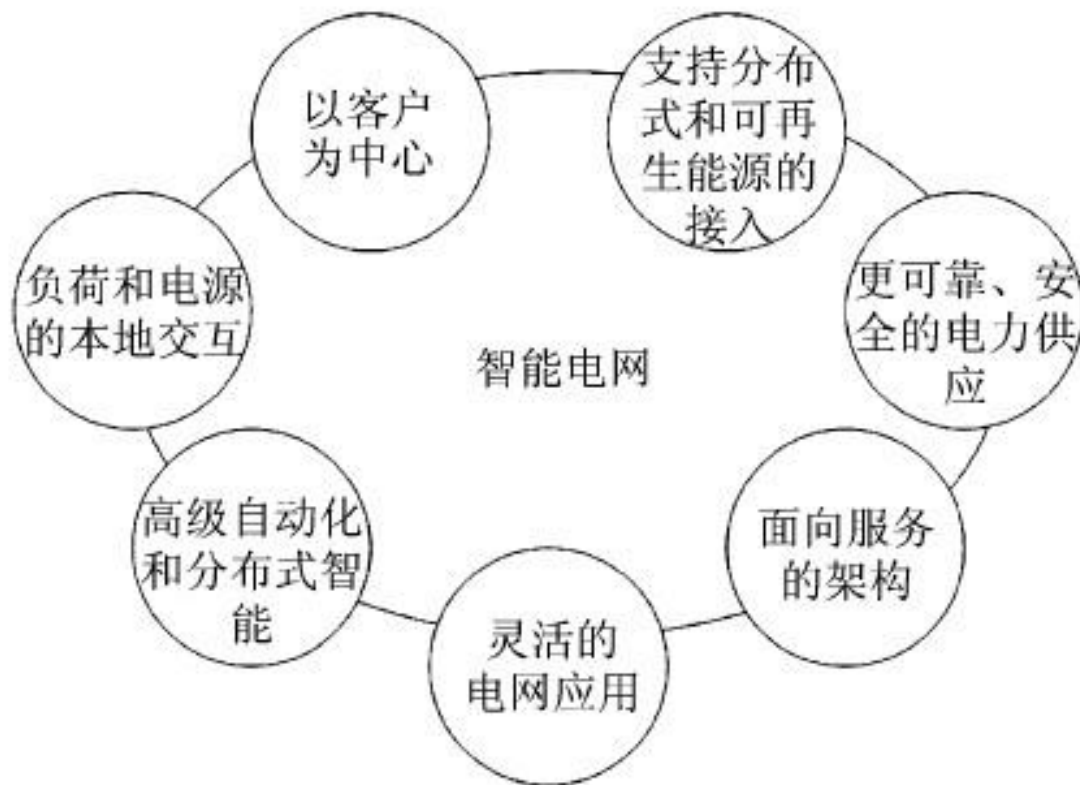
- 美国提出智能电网所具备的七大特征:
 - ①**自愈**: 通过安装的自动化监测装置可以及时发现电网运行的异常情况, 及时预见可能发生的故障; 在故障发生时也可以在没有或少量人工干预下, 快速隔离故障、自我恢复, 从而避免大面积停电的发生, 减少停电时间和经济损失;
 - ②**交互**: 消费者可以在知情的情况下与电力系统互动, 有能力选择最合适自己的供电方案; 也可以向电力公司提出个性化的供电服务要求, 以满足特殊需求 (**需求侧管理: Demand Side Management**);
 - ③**安全**: 现代化的电网在建设时就考虑要彻底安全性; 有效地提前预测, 做好预防措施;

- ④提供适应21 世纪需求的**电能质量**：现代化的电网的不会有电压跌落、电压尖刺、扰动和中断等电能质量问题，适应数据中心、计算机、电子和自动化生产线的需求；
- ⑤**兼容（适应）**所有的**电源种类**和**电能储存**方式：现代化的电网允许即插即用地连接任何电源，包括可再生能源和电能储存设备；集成所有监测、控制、保护、维护、调度和后台系统等；
- ⑥可**市场化**交易：现代化的电网支持持续的全国性的交易，允许地方性与局部的革新；
- ⑦**优化**电网资产**提高运营效率**：现代化电网可以在已建成系统中提供更多的能量，仅需建设少许新的基础设施，花费很少的运行维护成本（**资产管理：Asset Management**）。

智能电网基本概念

- 2. 欧洲定义

- 一个可整合所有连接到电网用户所有行为的电力传输网络，以有效提供**持续、经济和安全**的电力。



- 欧洲智能电网发展的主要特征为：
 - ① 灵活：满足社会用户的多样性增值服务；
 - ② 易接入：保证所有用户的连接通畅，尤其对于可再生能源和高效、无二氧化碳排放或很少的发电资源要能方便接入；
 - ③ 可靠：保证供电可靠性，减少停电故障；保证供电质量，满足用户供电要求；
 - ④ 经济：实现有效的资产管理，提高设备利用率。
- 重点在于：
 - ◆ 可再生能源、分布式电源并网技术
 - ◆ 储能技术、电动汽车与电网协调运行技术
 - ◆ 电网与用户的双向互动技术

智能电网基本概念

◇ 3.中国定义

- 中科院：智能电网是以包括各种发电设备、输配电网络、用电设备和**储能设备**的**物理电网为基础**，将现代先进的传感测量技术、网络技术、通讯技术、计算技术、自动化与智能控制技术等与物理电网高度集成而形成的新型电网。
- 国家电网：以物理电网为基础(中国的智能电网是以特高压电网为骨干网架、各电压等级电网协调发展的**坚强电网为基础**)，将现代先进的传感测量技术、通讯技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网。

- 中国智能电网主要内涵是：
 - ①**坚强可靠**：是指拥有坚强的网架、强大的电力输送能力和安全可靠的电力供应，从而实现资源的优化调配、减小大范围停电事故的发生概率。在故障发生时，能够快速检测、定位和隔离故障，并指导作业人员快速确定停电原因恢复供电，缩短停电时间。坚强可靠是中国坚强智能电网发展的物理基础；
 - ②**经济高效**：是指提高电网运行和输送效率，降低运营成本，促进能源资源的高效利用，是对中国坚强智能电网发展的基本要求；

- ③**清洁环保**：在于促进可再生能源发展与利用，提高清洁电能终端能源消费中的比重，降低能源消耗和污染物排放；是对中国坚强智能电网的基本诉求；
- ④**透明开放**：意指为电力市场化建设提供透明、开放的实施平台，提供高品质的附加增值服务，是中国坚强智能电网的基本理念；
- ⑤**友好互动**：即灵活调整电网运行方式，友好兼容各类电源和用户的接入与退出，激励电源和用户主动参与电网调节，是中国坚强智能电网的主要运行特性。

• 4.智能电网的关键技术:

- ① 先进的传感和测量技术
- ② 先进的设备技术
- ③ 先进的决策支持系统技术
- ④ 网络技术
- ⑤ 通讯技术
- ⑥ 计算技术
- ⑦ 自动化与智能控制技术等

它能够实现可观测、可控制、完全自动化和系统综合优化平衡，从而使电力系统更加清洁、高效、安全、可靠。

三、智能配电网

- 传统配电网
 - 被动配电网(Passive Distribution Network, PDN),其运行、控制和管理模式都是被动的。
 - 由大型发电厂生产的电力,流经输电网,通过配电网送到用户,因此中低压配电网即为电力系统的“被动”负荷。即使采用配电自动化,其核心控制思路仍是被动的,即在无故障的情况下,一般不会进行自动控制的操作。现有的配电网分析计算,无论损耗、电压和可靠性,都是基于最大负荷条件或平均负荷条件。因此,传统配电系统本来就不是为接入大量分布式能源而设计的。
- 智能配电网
 - (Smart Distribution Network, SDN)

三、智能配电网

- 与传统配电网相比，SDN具有以下功能特征：
 - 1) 自愈能力
 - 2) 具有更高的安全性
 - 3) 提供更高的电能质量
 - 4) 支持 DER 的大量接入（Dispersed Energy Resources）
 - 5) 支持与用户互动
 - 6) 对配电网及其设备进行可视化管理
 - 7) 更高的资产利用率
 - 8) 配电管理与用电管理的信息化

基本等同于SG的关键特征！

三、智能配电网

- 中国智能电网中配电环节的重点：

- 配电网网架建设和改造
- 配电自动化试点和实用化
- 关联和整合相关的信息孤岛
- 分布电源的接入与控制
- 配用电系统的互动应用等。

智能配电网是坚强智能电网的基石，
坚强在特高压，智能在配电网。

四、主动式配电网

- 相对于传统的被动式配电网（Passive Distribution Network, PDN）：
 - 主动式配电网（Active Distribution Network, ADN）
- 定义：
 - 分布式电源高度渗透、功率双向流动的配电网。
- 与智能（配）电网的关系：
 - 是未来智能配电网的重要组成部分。

主动式配电网的特点

- 主动式配电网的特点：
 - 延缓投资
 - 提高响应速度
 - 网络可视性以及网络灵活性
 - 较高的电能质量和供电可靠性
 - 较高的自动化水平
 - 更容易地接入DER（Dispersed Energy Resources）
 - 降低网络损耗
 - 更好地利用资产
 - 改进的负荷功率因数
 - 较高的配电网效率
 - 较高的供电质量和敏感客户的可用性

1、微电网与智能电网(智能配电网)、主动式配电网的关系是什么？与传统配电网又有什么不同？

Microgrid、 Smart Grids、 SDN与ADN的关系

- 微电网能够充分促进分布式电源与可再生能源的大规模接入，实现对负荷多种能源形式的高可靠供给，是实现主动式配电网的一种有效方式，是传统电网向智能电网（智能配电网）的过渡。
- 智能电网>智能配电网>主动配电网>微电网>分布式发电

能源互联网 (Energy Internet)

- 能源互联网的基本概念

— 是综合运用先进的电力电子技术，信息技术和智能管理技术，将大量由分布式能量采集装置，分布式能量储存装置和各种类型负载构成的新型电力网络、石油网络、天然气网络、智能交通系统等能源节点互联起来，以实现能量双向流动的能量对等交换与共享网络。

能源互联网

- 物联是基础

- 用先进的传感器、控制和软件应用程序，将能源生产端、能源传输端、能源消费端的数以亿计的设备、机器、系统连接起来，形成能源互联网的“物联基础”。

- 大数据分析、人工智能和预测是重要支撑

- 通过整合运行数据、天气数据、气象数据、电网数据、电力市场数据等，进行大数据分析、负荷预测、发电预测、人工智能、机器学习，打通并优化能源生产和能源消费端的运作效率，需求和供应将可以进行随时的动态调整。

能源互联网

- 能源互联网具备如下五大特征：
- **可再生**：可再生能源是能源互联网的主要能量供应来源。可再生能源发电具有间歇性、波动性，其大规模接入对电网的稳定性产生冲击，从而促使传统的能源网络转型为能源互联网。
- **分布式**：由于可再生能源的分散特性，为了最大效率的收集和使用可再生能源，需要建立就地收集、存储和使用能源的网络，这些能源网络单个规模小，分布范围广，每个微型能源网络构成能源互联网的一个节点。

- 能源互联网具备如下**五大特征**：
- **互联性**：大范围分布式的微型能源网络并不能全部保证自给自足，需要联起来进行能量交换才能平衡能量的供给与需求。能源互联网关注将分布式发电装置、储能装置和负载组成的微型能源网络互联起来。
- **开放性**：能源互联网应该是一个对等、扁平和能量双向流动的能源共享网络，发电装置、储能装置和负载能够“即插即用”，只要符合互操作标准，这种接入是自主的，从能量交换的角度看没有一个网络节点比其它节点更重要。
- **智能化**：能源互联网中能源的产生、传输、转换和使用都应该具备一定的智能。

能源互联网

- **电力改革不是限制，而是机遇**

- 大量的能源互联和互转必须通过**电力**，电力的计价和供应特性必须了解。必须懂**外语**，并且自如，因为在全球互联的角度，没有外语你的眼界和创新力无法提高。还需要懂些**金融，法律，材料，交通**……
- 能源互联网的内涵很深，任何一个维度都足够让任何一个专业出身的人重新出发。在电网控制的**软件领域**，**SCADA和EMS/DMS，虚拟电厂和需求侧管理**，稍微再作延伸就是**家庭能源管理系统和智能家居**；即使在传统的**硬件领域**，**智能电缆纠错器，手提变压器测试仪，即插即用的电气设备通信模块**……大量的创新将层出不穷。



你认为未来智能电网、能源互联网领域最有潜力的关键技术是（ 限选1项 ）：

- ☐ A 高比例新能源电网友好技术
- ☐ B 新型电力储能技术
- ☐ C 电力需求侧管理
- ☐ D 电力与能源市场
- ☐ E 电力大数据技术
- ☐ F 电力电子技术
- ☐ G 超导输电技术

提交

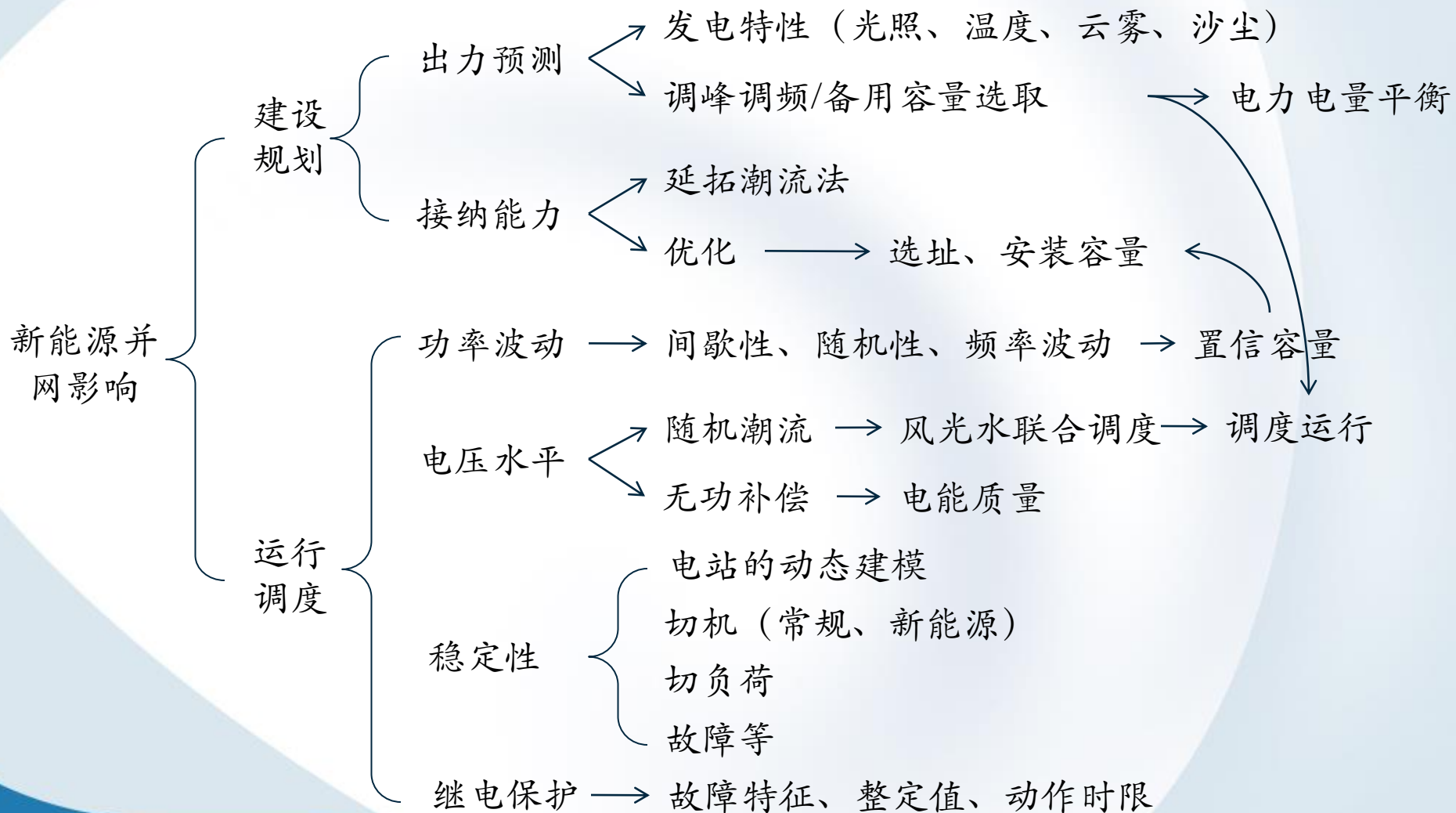
1.4 新能源电力系统的特点

新能源如风力发电、光伏发电的特点：

随机性、波动性、间歇性

风电、光伏发电等都大多具有随机性、波动性和间歇性的特点，再加上其预测、调度和控制上的技术瓶颈，使得这新能源的独立发电特性和源网协调性与常规电源相比仍有较大的差别。

新能源并网对系统影响的研究领域



一、新能源对潮流分布的影响

- 集中式大规模并网

- 直接像传统火电厂和水电站一样接入输电网，通过高压输电线路送至负荷中心。出力的随机性导致系统的潮流分布多变。

- 分布式接入配电网

- 接入配电网以后，减少了输电网向该地区输送的电力，既缓解了电网的输电压力，一般也会降低系统的网损。

二、对系统稳定性的影响

◆1.系统的暂态稳定性问题

- ◆风速或者光照强度的持续扰动。

◆2.系统的电压稳定性问题

- ◆故障清除后能够恢复机端电压;

- ◆动态无功补偿装置、及利用变速风电机组的动态无功支撑能力。

◆3.机组本身的低电压穿越能力问题

- 1.系统的暂态稳定性问题

- 主要体现在大规模的新能源机组的发电功率受到风速或者光照强度的持续扰动，如果风电和光伏规模足够大，瞬间增加或者损失的功率将会导致传统机组减速或者加速，其转速能否不失去同步，依赖于具体的机组动态模型，网架结构和所受扰动的强弱，应进行理论分析和时域仿真。

- 2.系统的电压稳定性问题

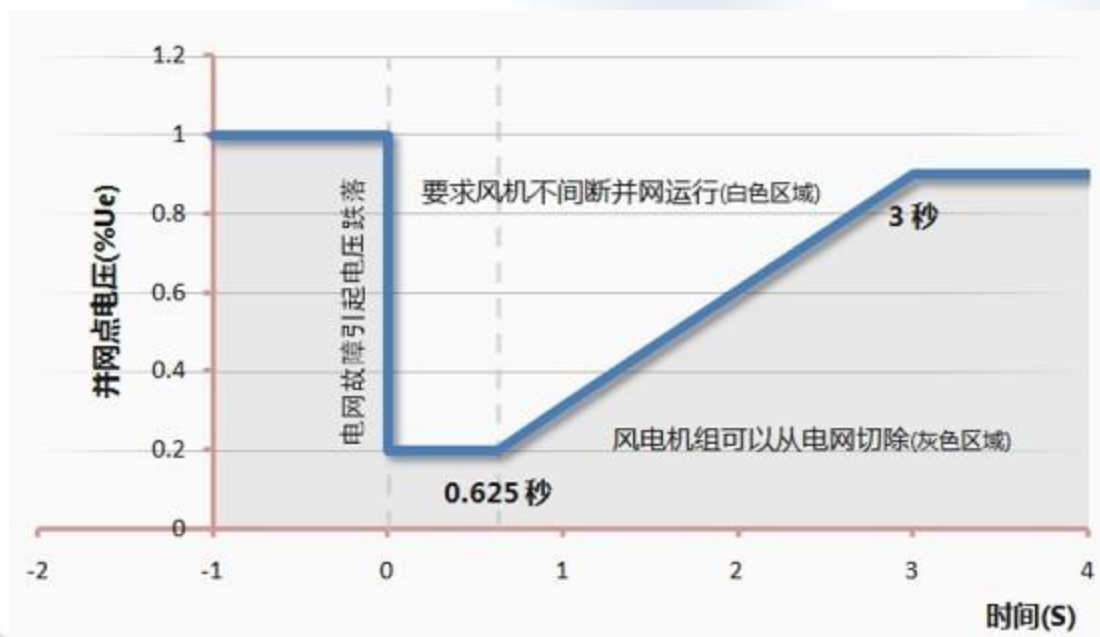
- 如果地区电网较弱，则风电机组在系统故障清除后无法重新建立机端电压，风电机组运行超速失去稳定，就会引起地区电网暂态电压稳定性的破坏。

- 此时，需利用风电场或风电机组的**保护**将风电场或风电机组切除以保证区域电网的暂态电压稳定性；
 - 或者通过在风电场安装**动态无功补偿装置**、及利用变速风电**机组的动态无功支撑能力**在暂态过程中及故障后电网的恢复过程中支撑电网电压，保证区域电网的暂态电压稳定。

- 3.机组本身的低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)

- 风电场的低电压穿越（其他新能源发电也有类似要求）

- 定义：指在风机并网点电压跌落的时候风机能够保持并网，甚至向电网提供一定的无功功率，支持电网恢复电压，直到电网恢复正常，从而“穿越”这个低电压时间。



国家电网公司风电场接入电网技术规定（2009修订版）

3.低电压穿越LVRT

- 我国风电机组低电压穿越的技术要求：
 - a)风电场必须具有在电压跌至20% (德国15%)额定电压时能够维持并网运行625ms的低电压穿越能；
 - b)风电场电压在发生跌落后3s 内能够恢复到额定电压的90%，风电场必须保持并网运行；
 - c)风电场升压变高压侧电压不低于额定电压的90%时，风电场必须不间断并网运行。

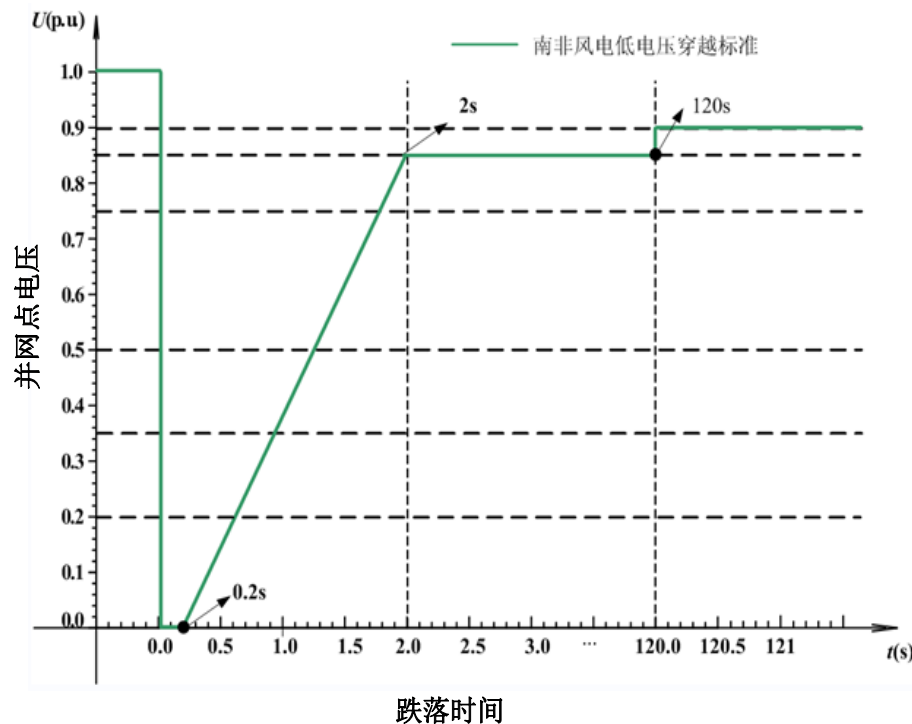
零电压穿越

- 2011年南非并网标准对风电场提出零电压穿越的技术要求
 - 要求风电场内风电机组具备在并网点电压跌落至0时能够保持并网运行200ms的低电压穿越能力。风电场并网点电压在发生跌落后2s内能够恢复到额定电压的85%时，风电场内风电机组保持并网运行。
- 国家电网公司2013年也开始对新并网的风电场提出零电压穿越要求。

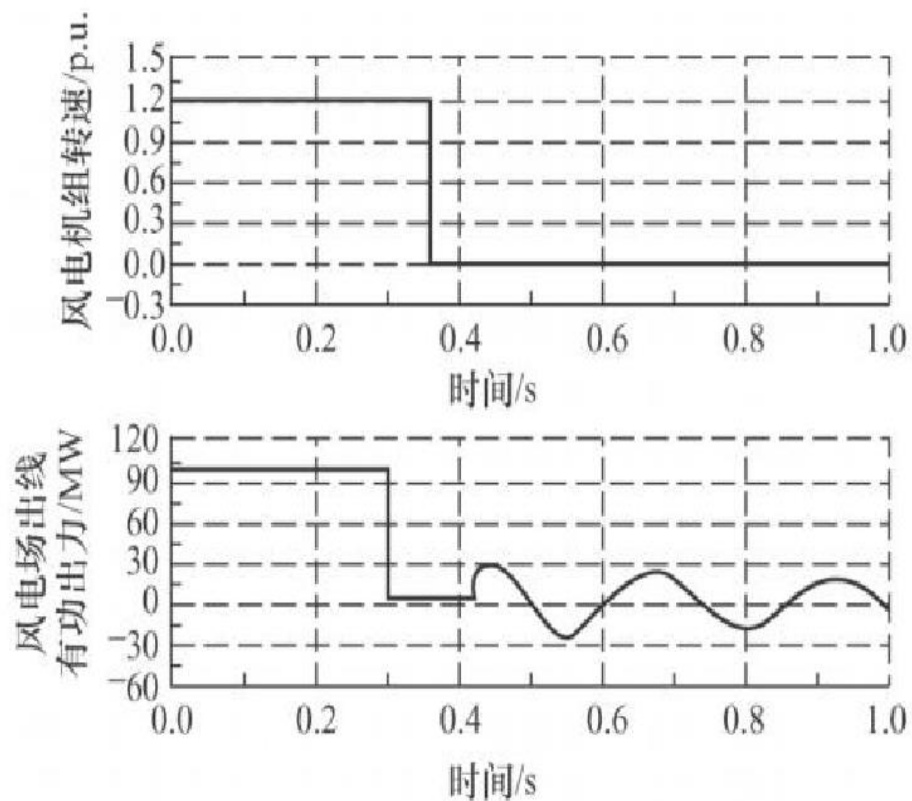
零电压穿越

- 标准中的相关要求:

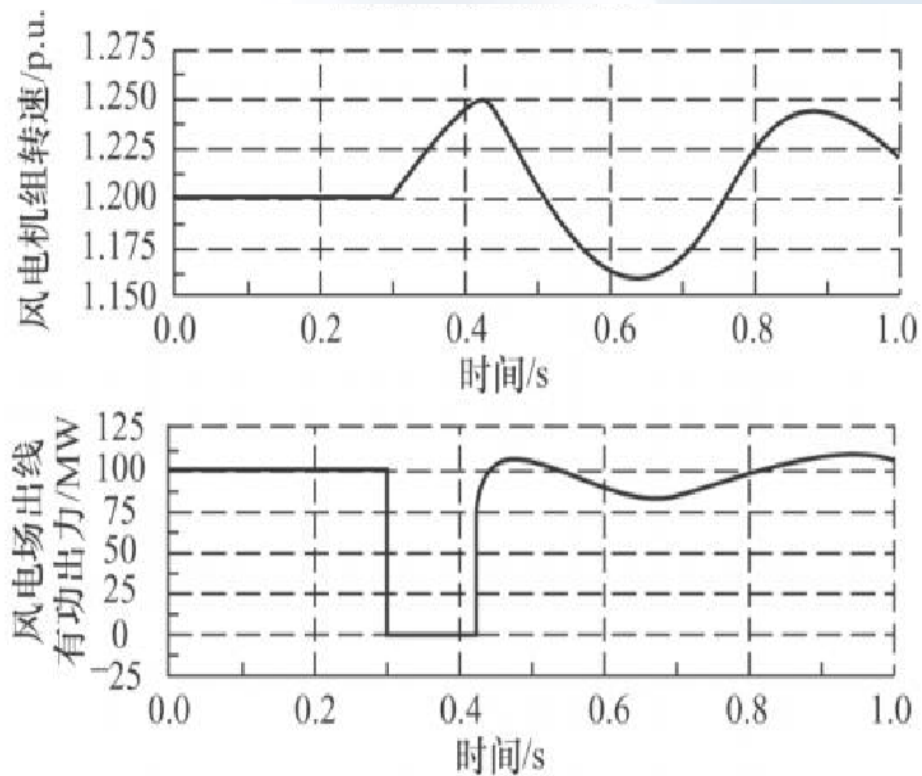
- 1) 风电机组在电压跌落至**0V**可以保证不间断运行**200ms**;
- 2) **2s**内能够恢复到额定电压的**85%**;
- 3) 风电机组在零电压穿越过程中具备**向电网输出无功功率以支撑电网电压**的能力。



国内已具备零电压穿越能力的1.5MW机组：
金风1.5MW、联合动力UP-1500



(a) 无低电压穿越能力



(b) 有低电压穿越能力

电网发生故障时，有无低电压穿越能力两种情况下的电压波形图

三、新能源对调度运行的影响

- 1. 系统调度运行中的主要问题
 - 电力电量平衡 (Power and Energy Balance)
 - 调峰备用 (Reserve Capacity)
 - 调频问题 (Frequency Control)

- 1)电力电量平衡

- 由于电力系统运行人员均会针对长期、中长期、短期、超短期、日前负荷进行预测，进而制定机组的开机方式和发电计划，而新能源电力系统中含有风电、光伏等出力具有波动性特点的电源类型，对调度运行，尤其是对逐日、逐月的电力电量平衡将产生影响，必须首先提高负荷预测、风电、光伏发电的功率预测。

- 2)调峰备用

- 风能、太阳能资源具有随机性、波动性、间歇性等特点。当风电、光伏发电在电源中的比例不断增大的时候，对电网调峰的影响将愈加显著。
- 风电机组通常晚上风能资源更丰富、光伏电池只在白天发电，具有不同的调峰特性。在没有研制出大功率的电力储能装置之前，新能源随机波动产生的功率缺额就对系统的带来更大的调峰压力。

- 3)调频问题

- 大容量的风电、光伏发电系统接入电网，其发电功率的随机波动，将会导致电网的频率处于不断的波动之中，甚至有可能使频率偏差超过允许值。风电和光伏在风速、云层等气象参数的瞬时扰动下，可能会对调频机组的频率响应、频率控制带来问题。

三、新能源对调度运行的影响

- 2. 新能源风电、光伏的功率预测技术
 - 区别于传统的负荷预测（Load Forecasting）
 - 编制发电调度计划（Generation Dispatching）
 - 机组组合优化（Unit Commitment）

四、新能源对电能质量的影响

◇ 1.电压偏差

- ◇ 风速随机变化

- ◇ 并网和脱网、补偿电容器的投切等操作

◇ 2.电压波动与闪变

- ◇ 风速的波动

- ◇ 尾流效应影响

- ◇ 风力机的机械特性

◇ 3.谐波污染

◆ 1.电压偏差

- 风力机输出功率随着风速随机变化，**风电场注入电网的有功功率和吸收的无功功率也会有所改变**，引起风电场母线及附近电网电压的波动；
- 同时，风力发电机组**并网和脱网**、补偿电容器的**投切**等操作时对电网电压造成冲击。

◆ 2.电压波动与闪变

- 电压波动和闪变通常会引起许多电工设备不能正常工作，如影响电视画面质量、使电动机转速脉动、使电子仪器工作失常、影响自动控制设备的正常工况、使白炽灯光发生闪烁等；
- 在运行过程中的电压闪变是由功率波动引起的，而功率波动主要源于风力机前端风速的变化、尾流效应、塔影效应等（对应光伏即云层的快速飘动、阴影遮挡等）。

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}$$

当风电机组/光伏电站通过整流和逆变装置接入系统时，如果电力电子装置的切换频率恰好在产生谐波的范围内，则会产生很严重的谐波问题。

- 3.谐波污染之危害：

- 增加电力网中发生谐振的可能；
- 增加电气设备附加损耗；
- 加速绝缘老化，缩短使用寿命；
- 继电保护、自动装置不能正常动作；
- 仪表不能正确计量；
- 干扰通信系统。

第一章 小结

- 新能源发电类型
- **DG**概念、优点
- 新能源并网变换器拓扑、优缺点
- **Microgrid**概念
- **Smart Grid**概念
 - 智能电网特征、关键技术
- **Active Distribution Network**概念
- **Energy Internet**的概念
- 新能源对电力系统的影响
 - 潮流分布、稳定性、发电与调度计划、电能质量

