



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

新能源电力系统规划与运行

主讲人：刘 俊

单 位：电力工程系

西安交通大学电气工程学院

时 间：2020.4~2020.6



电气工程学院

school of electrical engineering

课程简介

课程名称：《新能源电力系统规划与运行》

英文名称：《Planning and Operation of Power Systems with Renewable Energy》

学 时：32 + 8

学 分：2

适用对象：电气工程专业三、四年级本科生

先修课程：《电路》、《电磁场》、《电机学》、《电力系统稳态分析》

参考书目

1. 课程讲义及PPT
2. 刘长浥，冯双磊 译，《风电并网——联网与系统运行》，机械工业出版社，2011.
3. 徐青山，《分布式发电与微电网技术》，北京：人民邮电出版社，2011.
4. 张兴，曹仁贤，《太阳能光伏并网发电及其逆变控制》，北京：机械工业出版社，2010.
5. 王锡凡 主编，《电力系统规划基础》，西安：西安交通大学出版社，1994.
6. 夏道止 主编，《电力系统分析》（第二版），北京：中国电力出版社，2010.

课程性质和目的

1. 性质：专业基础课

2. 目的：

- ① 掌握新能源风电、光伏发电的原理。
- ② 掌握以电路学原理进行新能源电力系统稳态分析。
- ③ 熟悉计算机求解含新能源电力系统潮流的方法。
- ④ 熟悉对随机波动性新能源的数学建模方法。
- ⑤ 掌握含新能源发电系统规划领域的重要概念和方法。
- ⑥ 培养分析实际系统运行中频率和电压调整的思想。

课程资源

- 西安交通大学教师个人主页-
<http://gr.xjtu.edu.cn/web/eeliujun>
- 课程教学- “《新能源电力系统规划与运行》
课程资料下载” 文件夹

联系方式

- Office: 东二楼-电力工程系137
- Email: eeliujun@mail.xjtu.edu.cn
- 电 话: [029-82668782](tel:029-82668782)
- 答 疑: 每周五7-8节



考 核

- 平时表现占 **10 %**
- 实验、思考题、课程报告占 **20 %**
- 考试成绩占 **70 %**



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 1

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。

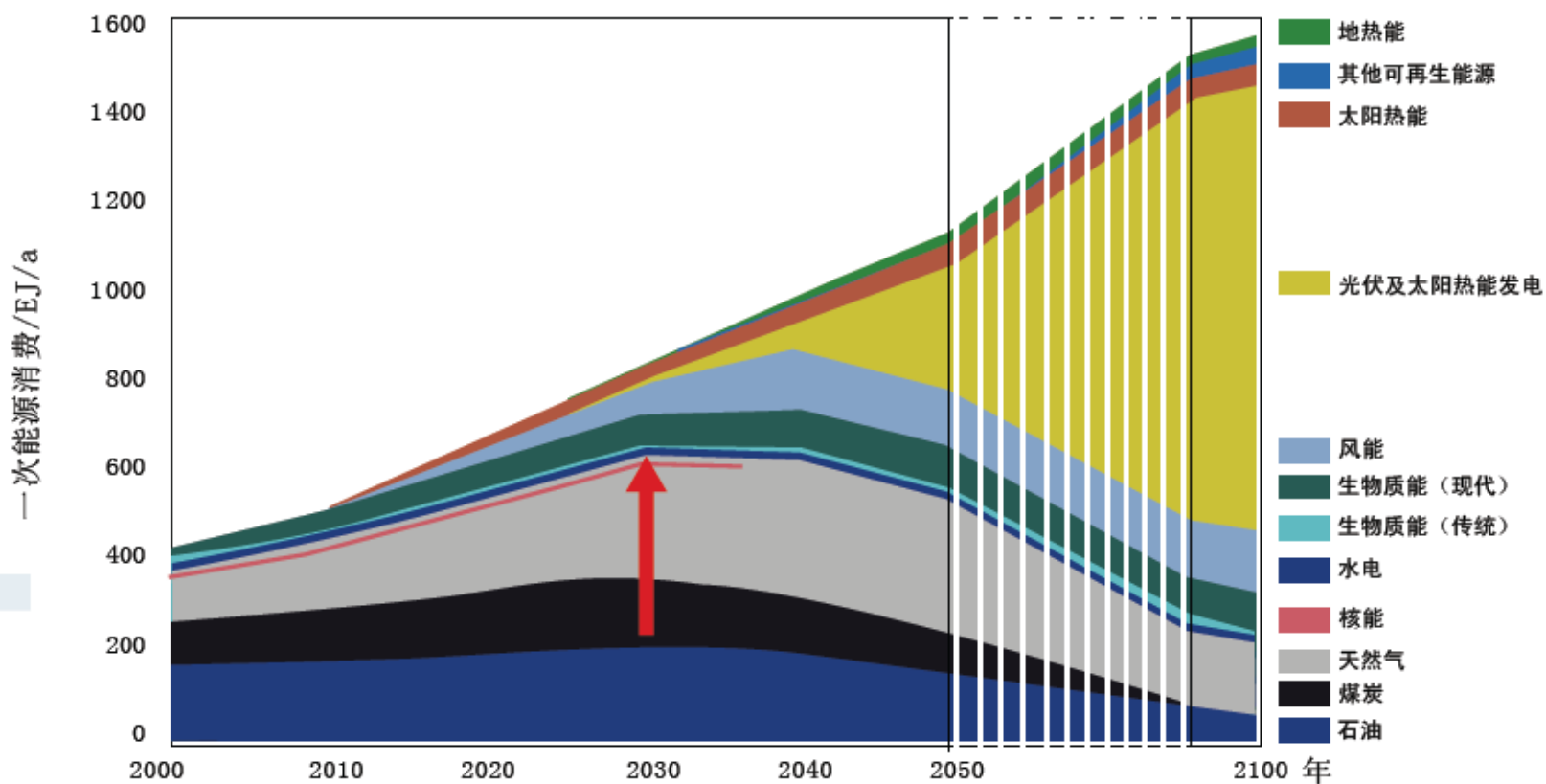
1.1 新能源发电概述

一、背景：能源危机、雾霾笼罩

世界常规能源储备状况及剩余使用年限（自2000年开始计算）

能源种类	世界	中国
太阳能	无穷大	无穷大
石油	约45年	约15年
天然气	约61年	约30年
煤炭	约230年	约81年
铀	约71年	约50年

世界能源结构预测



世界能源结构预测（资料来源：欧盟联合研究中心，2004年）

◆ 太阳能在能源结构中的比例预测

据欧盟联合研究中心预测，未来太阳能在发电能源结构中的比重将逐步上升，到2100年将占64%的比重，成为最广泛的发电模式。

能源利用：	2050年	2100年
可再生能源	52%	86%
太阳能（包括太阳能热利用）	28%	64%

目前可再生能源发电占世界发电总量不到25%，
增长潜力巨大。

1、新能源发电的类型包括哪些？

- ☒ A 风力发电
- ☒ B 太阳能发电
- ☐ C 核电
- ☒ D 生物质能
- ☒ E 海洋能
- ☒ F 地热能
- ☒ G 氢能

二、新能源发电的类型

- 风力发电
 - 光伏发电
 - 生物质能
 - 海洋能
 - 地热能
 - 氢能等
- 热点、重点

问题：新能源是否都是可再生能源？

风力发电 (Wind Power)

- 能量转换过程：风能-机械能-电能
- 风能的来源：太阳能
- 利用最早的新能源：风车汲水、磨坊
- 最早利用风力发电：
 - 上世纪三十年代，丹麦、瑞典、苏联和美国应用航空工业的旋翼技术,成功地研制了一些小型风力发电装置。
 - 目前应用较多的是水平轴风力机，且多用螺旋桨型叶片。水平轴风力机包括风轮、塔架、机舱等部分。

风力发电

—风轮是由轮毂及安装于轮毂上的若干叶片(桨叶)组成，是风力机捕获风能的部件；

—塔架是风力机的支撑结构；

—机舱内集中放置调向装置、控制装置、传动机构、发电机等。



风力发电机制造十大（2016）

1. 金风科技：中国最早风机制造企业，新疆
2. (Vestas) 风机制造领头羊——维斯塔斯：丹麦
3. (GE Energy) GE能源公司：美国
4. (Siemens) 西门子：德国
5. (Gamesa) 歌美飒：西班牙
6. Enercon公司：德国
7. 联合动力
8. 远景能源
9. 明阳风电
10. 海装风电

来源：《可再生能源世界》(Renewable Energy World) 杂志.



太阳能发电 (Solar Power)

(1) 太阳能热发电 (Solar Thermal Power)

- 太阳能热发电就是利用太阳辐射所产生的热能发电，是在太阳能热利用的基础上实现的。
- 一般需要先将太阳辐射能转变为热能，然后再将热能转变为电能，实际上是“光—热—电”的转换过程。
- 太阳能热发电有两种类型：一类是蒸汽热动力发电，一类是热电直接转换。

太阳能发电

(1) 太阳能热发电

- 塔式



太阳能发电

(1) 太阳能热发电

- 槽式



- 太阳辐射能量——成份

- 红外线 ($>0.76\mu\text{m}$) : 约43% (热) -> 太阳能热利用
- 可见光 ($0.4\sim0.76\mu\text{m}$) : 约50% -> 太阳能光伏发电
- 紫外线 ($<0.4\mu\text{m}$) : 约7% (其中99%被臭氧层吸收掉)

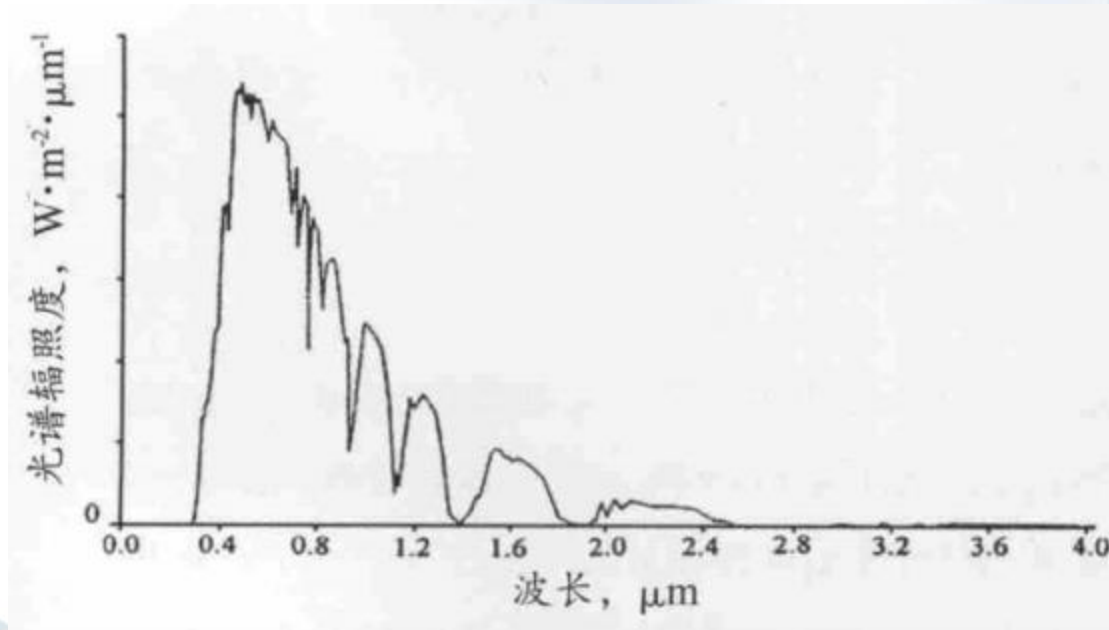


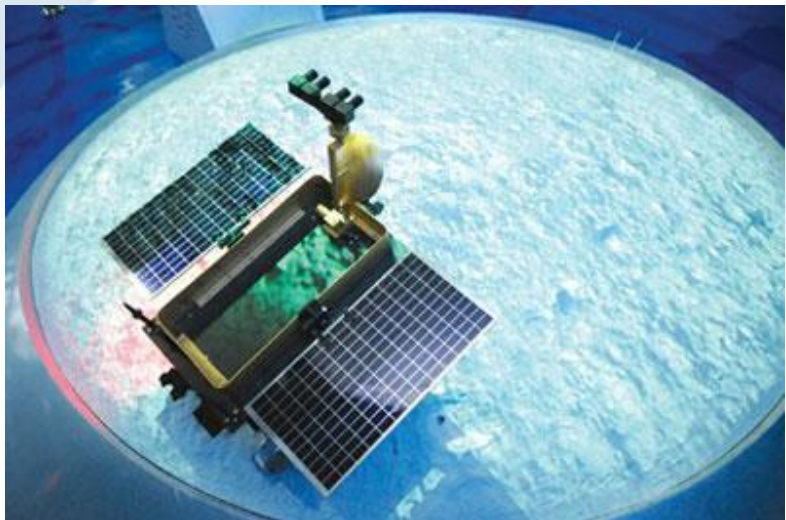
图1 AM1.5G 标准太阳光谱分布

太阳能发电

(2) 太阳能光发电

- 太阳能光发电是指不通过热过程而直接将光能转变为电能的发电方式。广义的光发电，包括：
 - 光化学发电，如光电解电池和光催化电池。
 - 光感应发电，是利用某些有机高分子团吸收太阳能后变成光极化偶极子的现象。
 - 光伏发电，是利用某些物质的光电效应（光生伏特效应），将太阳光辐射能直接转变成电能的发电方式。

光伏发电 (Photovoltaic)



光伏组件制造十大（2019）

Global solar photovoltaic module
shipments ranking, 2019



- 1.晶科
- 2.晶澳
- 3.天合
- 4.隆基
- 5.阿特斯
- 6.Hanwha Q CELLS
- 7.东方日升
- 8.First Solar
- 9.协鑫
- 10.顺风

2019 ranking	Solar PV manufacturer	Change vs 2018	2018 shipments	2019 shipments	% Growth
1	Jinko Solar Holding Co., Ltd.	-	11.4	14.2	25%
2	JA Solar Holdings Co Ltd	-	8.8	10.3	17%
3	Trina Solar Limited	-	8.1	9.7	20%
4	LONGi Solar Technology Co Ltd	-	7.2	9.0	25%
5	Canadian Solar Inc	-	7.1	8.5	20%
6	Hanwha Q CELLS Co., Ltd.	-	5.5	7.3	33%
7	Risen Energy Co., Ltd.	-	4.8	7.0	46%
8	First Solar Inc.	+3	2.7	5.5	104%
9	GCL System Integration Technology Co., Ltd.	-1	4.1	4.8	17%
10	Shunfeng Photovoltaic International Limited	-1	3.3	4.0	21%

Note: The preliminary results are based on the initial assessment of the shipments and are subject to change later

Source: GlobalData, Power Intelligence Center

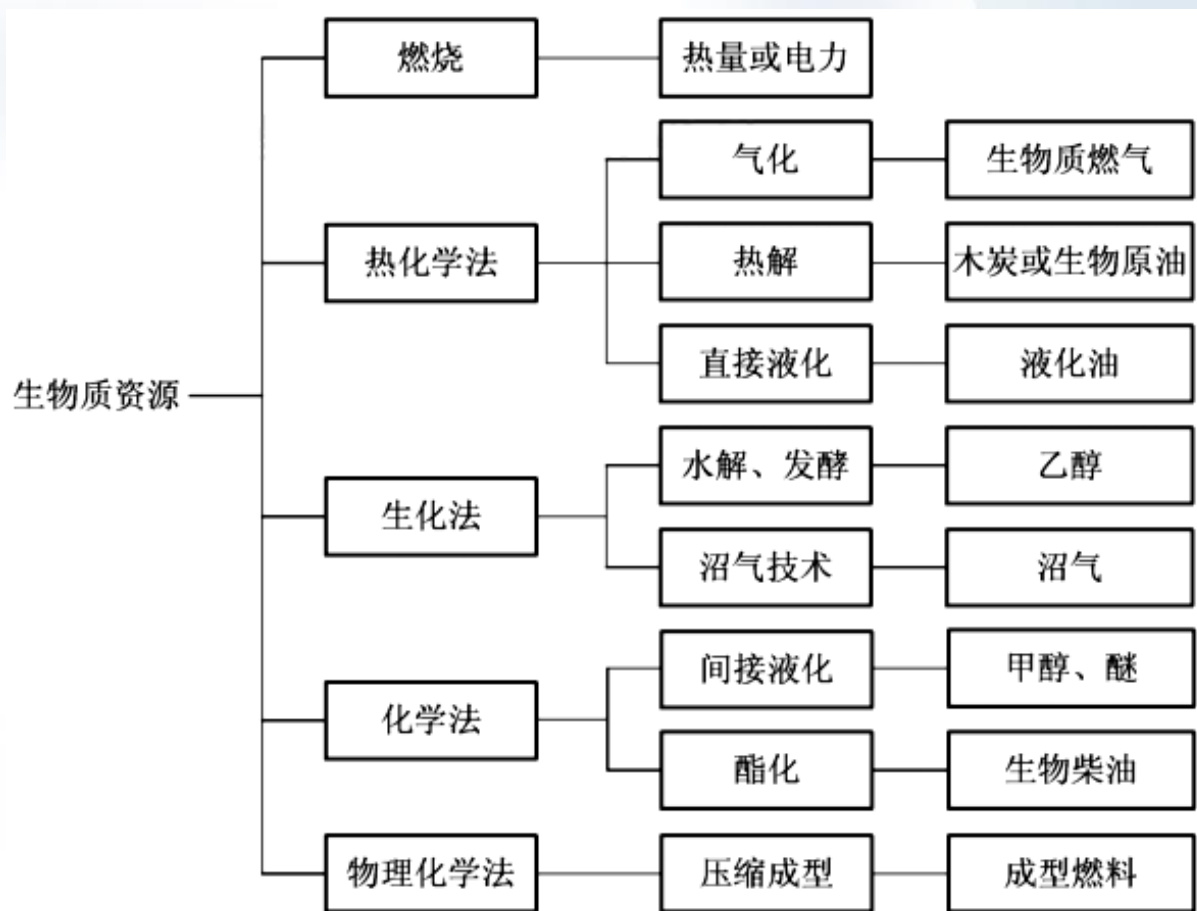
光伏逆变器制造十大（2015）

- 2013中国合肥阳光电源跻身前十，2015中国华为、阳光跻身前三。

Ranking by Total PV Inverter Revenue (\$M)	
Rank	Company
1	SMA
2	Huawei
3	Sungrow
4	ABB
5	SolarEdge
6	TMEIC
7	Enphase
8	Omron
9	Tabuchi
10	Fronius

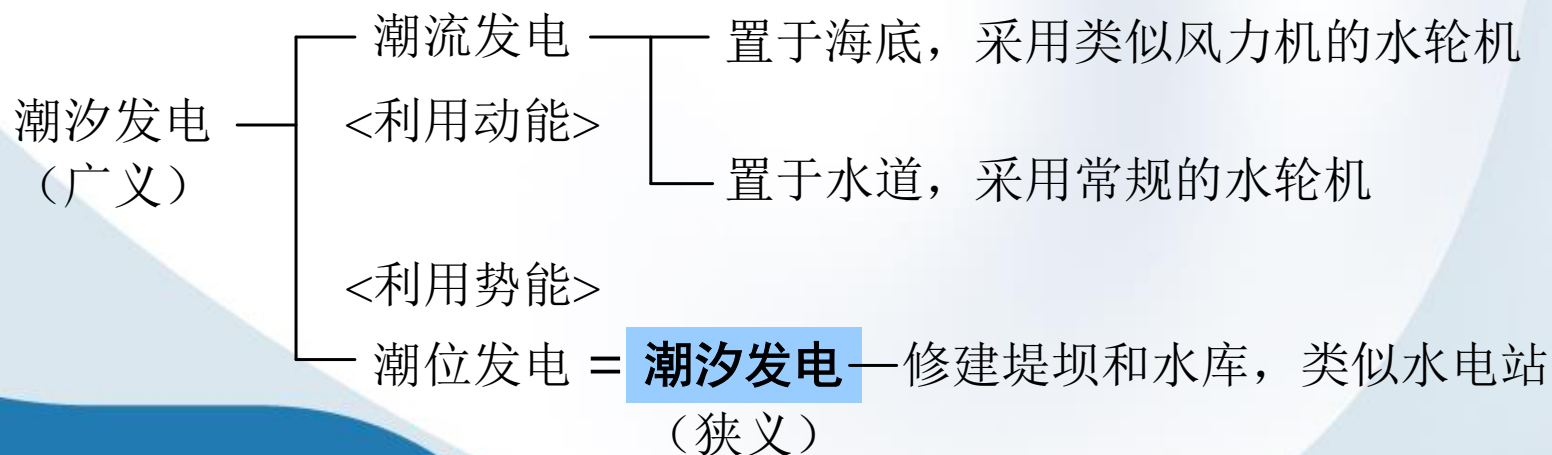
生物质能（Biomass）

- 生物质能，指蕴藏在生物质中的能量。
- 是直接或间接地通过光合作用，把太阳能转化为化学能后固定和贮藏在生物体内。



海洋能 (Ocean Energy)

- 海洋能源是海水中蕴藏着的一切的能量资源的总称，通常指海洋中所蕴藏的可再生的自然能源。
- 以潮汐、波浪、温度差、盐度梯度（盐差）、海流等形式存在。
- 海水涨落及潮水流动所产生的动能和势能称为潮汐能 (Tidal Energy) 。



地热能 (Geothermal Energy)

- 地球内部的热量，主要来自放射性元素的衰变。
- 放射性元素的衰变是原子核能的释放过程。高速粒子的动能与辐射能在与其它物质的碰撞过程中转变为热能。
- 目前可开发的地热田主要是热水田和蒸汽田。
 - 热水田
热水田提供的地热资源主要是液态的热水。
 - 蒸汽田
蒸汽田的地热资源包括水蒸汽和高温热水。

氢能 (Hydrogen Energy) 和燃料电池

- 氢能主要是指氢元素燃烧、发生化学反应或核聚变时释放的能量。
- 利用氢能的方式较多，包括：
 - 直接作为燃料提供热能或在热力发动机中做功；
 - 制造燃料电池(Fuel Cell)，在催化剂作用下进行化学反应生产电能；
 - 利用氢的热核反应释放出核能；等等。
- 制造氢能的方式，包括：
 - 太阳能制氢、水分解制氢、化石燃料制氢、生物制氢

问题：氢能是一次能源还是二次能源？

另外，氢能是否属于可再生能源？

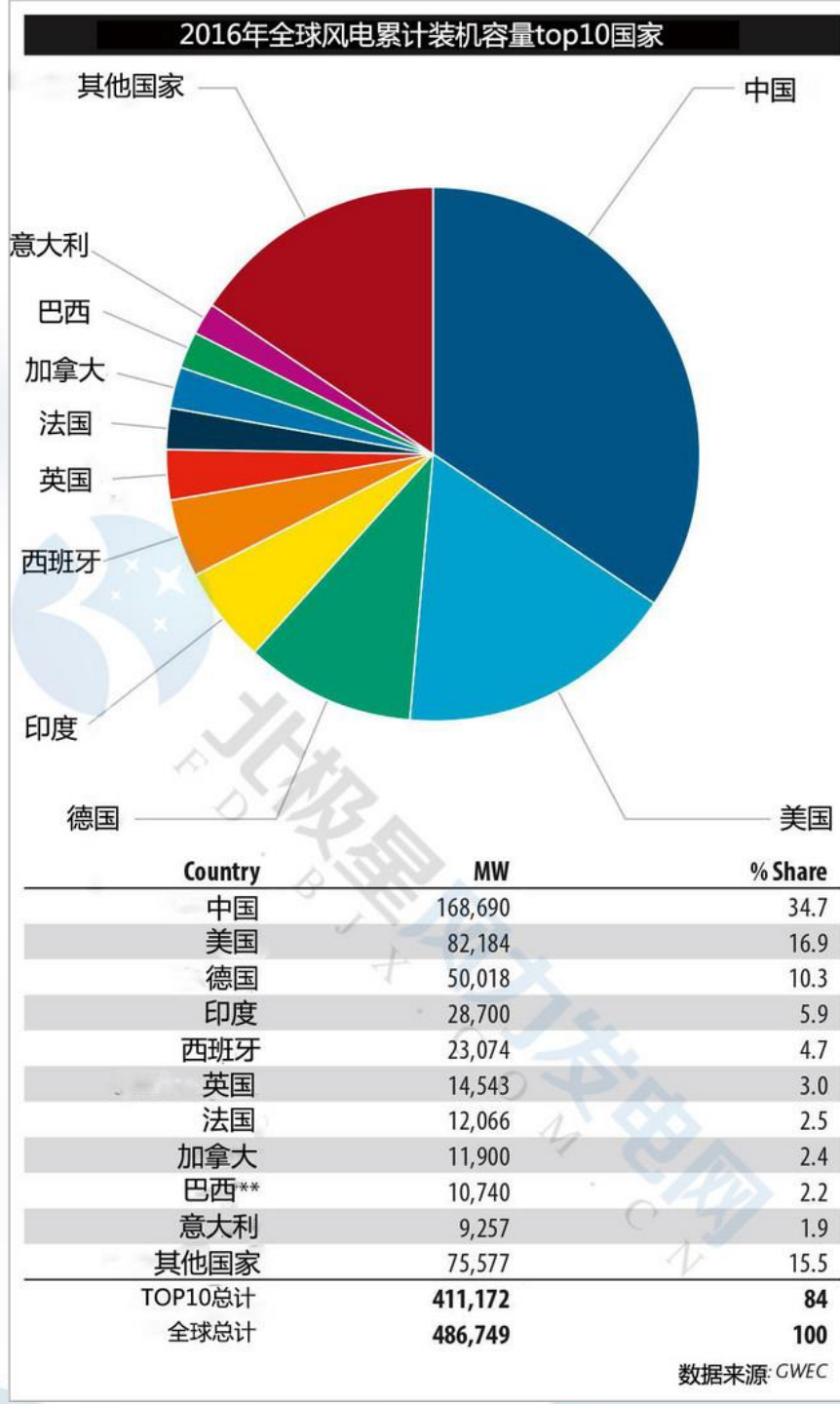
课后阅读

- 详细介绍各种新能源的发电原理：
 - 王革华. 《新能源概论》
 - 朱永强. 《新能源与分布式发电技术》

三、全球发展现状

- 风力发电

- 风机装机容量



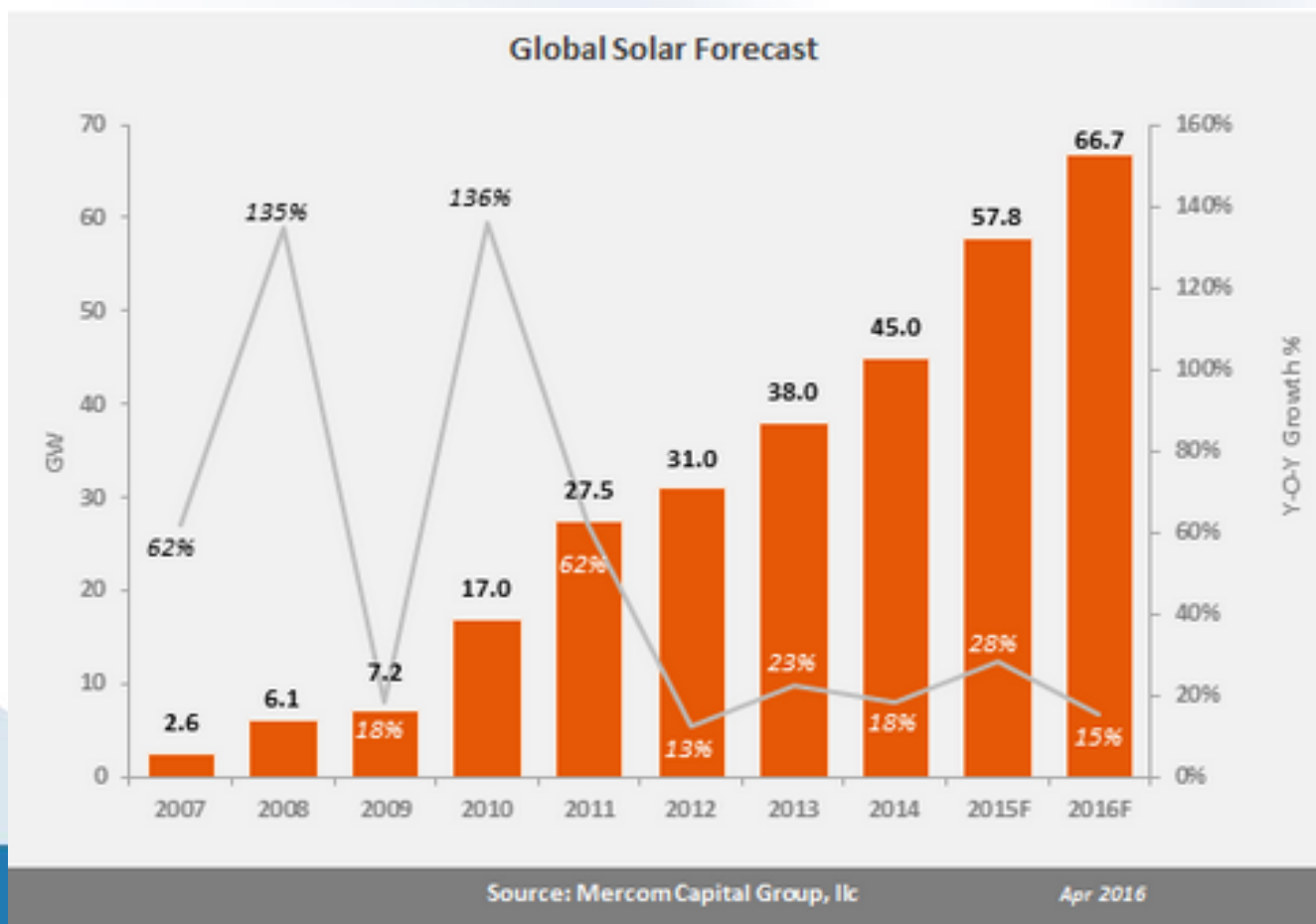
三、全球发展现状

- 风力发电

- 根据全球风能理事会发布**2016**年全球风电发展的统计数据：**2016**年全球市场新增容量超过**54.6GW**，全球累计容量达到**486.7GW**。主要由**中国、美国、德国和印度**引领新增装机。
- **2016**年中国的风电装机容量有所下降，这主要是由于**2015**年抢装后的回调；但中国**海上风电**装机容量在**2016**年大幅增加，超过丹麦排在**全球海上风电装机榜单第三位**，紧随英国和德国。

三、全球发展现状

- 光伏发电
 - 光伏装机容量



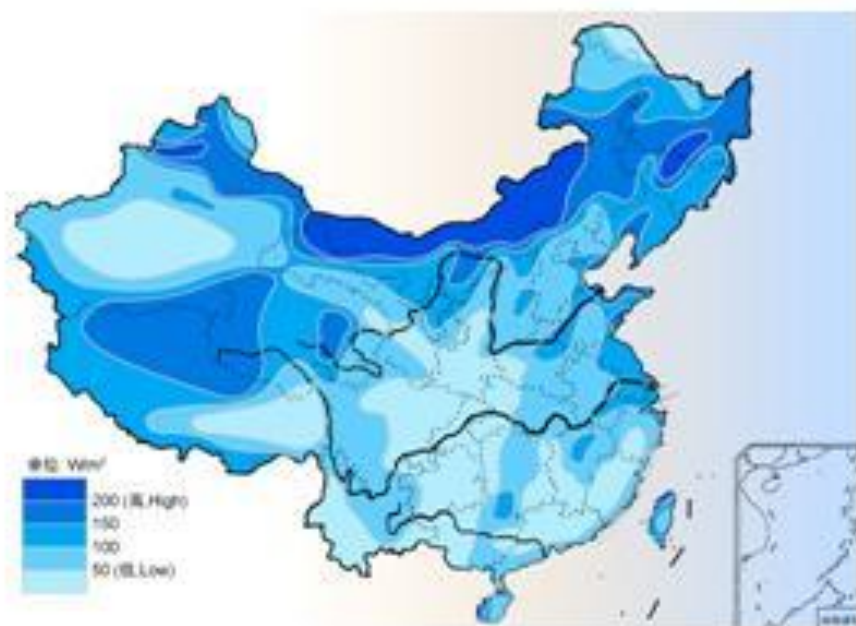
三、全球发展现状

- 光伏发电

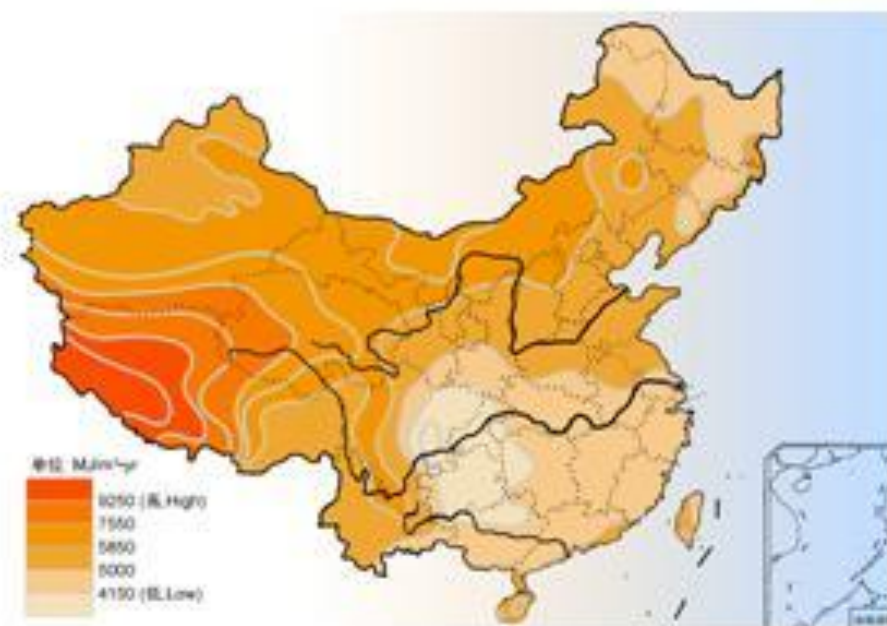
- Mercom资本发布的预计报告中，2016年全球新增太阳能装机容量中，中国、美国、日本和印度是新增太阳能装机容量贡献最大的四个国家。
- 根据德国太阳能协会的统计数据，2016年全球光伏新增光伏装机70GW，比2015年增长大约30%。2016年的全球新增装机可发电900亿千瓦时，可满足2500万户居民（年均耗电3500千瓦时）的需求。全球光伏装机容量超过300GW的里程碑。

四、我国发展现状

- 我国风能与太阳能资源分布



中国大陆10米高度年平均风功率密度分布图(90年代)



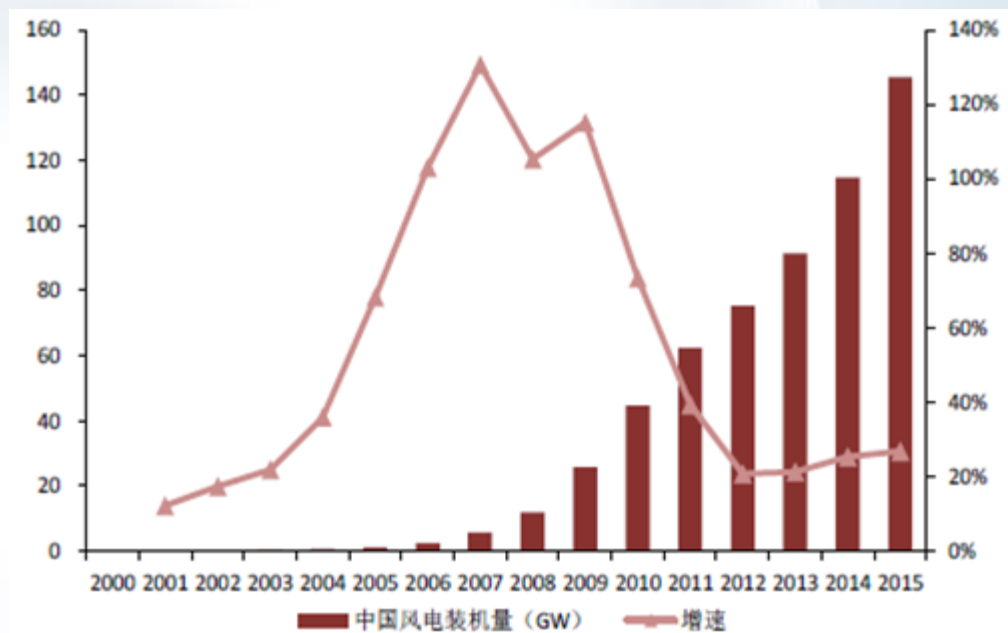
中国太阳能资源分布图 ($MJ/m^2 \cdot year$)

中国风能和太阳能资源分布图

四、我国发展现状

• 风力发电现状

- 我国的风电自2003年进入高速发展时期。
- 2015年国内风电新增装机容量达到**30.5GW**，创出新高且连续6年领跑全球。



2000-2015年中国风电装机量

四、我国发展现状

• 风力发电现状

- 根据能源局2020年能源需求预测的基准方案，2020年风电装机目标是2.1亿千瓦，相当于12个三峡电站；平均每年新增装机在42GW，年均复合增速在10.9%。
- 在风电装机和发电量持续增长的同时，弃风现象愈加严重。2016年第一季度，全国平均弃风率达到26%，比15年同期上升7个百分点。分地区来看，弃风主要发生在吉林、新疆、甘肃、辽宁、黑龙江、内蒙古、宁夏、山西、河北等地，其他省份则基本没有弃风。

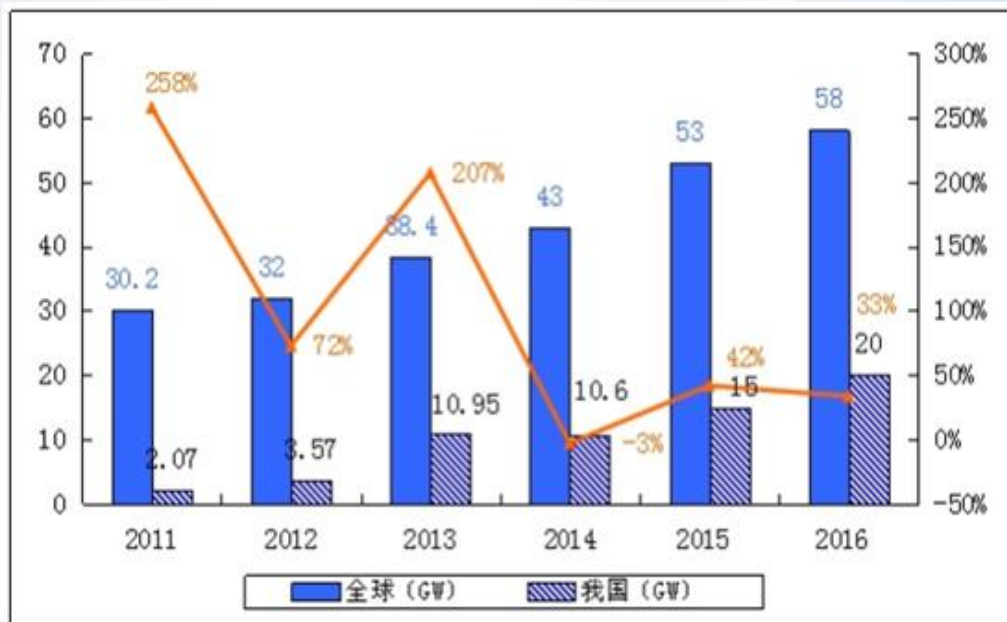
2016年Q1我国各地弃风量情况

省份	弃风率 (%)	利用小时数 (小时)	省份	弃风率 (%)	利用小时数 (小时)
吉林	53%	224	安徽	-	588
新疆	49%	189	福建	-	755
甘肃	48%	294	江西	-	467
辽宁	40%	347	河南	-	564
黑龙江	36%	345	湖北	-	472
内蒙古	35%	475	湖南	-	505
宁夏	35%	264	重庆	-	375
山西	19%	518	四川	-	738
河北	18%	563	陕西	-	540
云南	4%	753	青海	-	458
山东	3%	512	西藏	-	705
北京	-	660	广东	-	399
天津	-	568	广西	-	588
上海	-	656	海南	-	482
江苏	-	621	贵州	-	355
浙江	-	564	合计	26%	422

四、我国发展现状

• 光伏发电现状

- 截至2016年底，我国光伏发电新增装机容量**3454万千瓦**，累计装机容量**7742万千瓦**，**新增和累计装机容量均为全球第一**；
- 此外，**分布式光伏发电**装机容量发展提速，**2016年新增装机容量424万千瓦**，比2015年新增装机容量增长**200%**。



2011-2016 年我国光伏新增装机量、增长率及全球新增装机量

四、我国发展现状

• 光伏发电现状

- 2013年中国光伏装机总量首次超越美国成为全球第一大光伏装机市场，累计装机量达到18.1GW，占全球光伏装机总量的13.2%；
- 2016年中国以高达34.5GW的总装机量继续领跑全球光伏市场。而这也是自2013年以来，中国连续4年获得光伏装机总量的第一名。国家能源局最新公布的光伏十三五规划来看，2020年光伏计划装机将超过100GW。

2016年上半年我国各地弃光量情况

- 根据国家能源局的统计数据，2016年上半年**西北地区的弃光问题严峻**，弃光电量达到32.8亿千瓦时，弃光率19.7%。其中，新疆、甘肃光伏发电运行较为困难，弃光率分别为32.4%和32.1%。去年一季度，新疆弃光率甚至一度达到52%。整个2016年，**西部地区平均弃光率达到20%**。
- 为了解决西部的弃光问题，国家已经有意识地将光伏发电装机**向中东部区域转移**。在2016年的新增光伏发电装机中，西北地区为9.74GW，仅占全国的28%；西北以外地区为24.8GW，占全国的72%。
- 此外，大力**推广分布式光伏电站**的建设，使得光伏电站可以在工业较为发达、但土地资源相对不足的东部、沿海地区生根发展，建设光伏电站的同时还解决了这些电站的消纳问题。

新能源接入电力系统的方式：

一、新能源集中式并网

- 新能源并网方式(相对于离网独立或孤岛运行)
 - 集中式并网
 - 分布式并网
- 集中式并网基本原则：
 - 充分利用荒漠地区丰富和相对稳定的太阳能、风能资源构建大型光伏电站、风电场，接入高压输电系统供给远距离负荷。

新能源接入电力系统的方式：

一、新能源集中式并网

- 优点：

- 1、风电、光伏出力稳定性有所增加，并且充分利用太阳辐射与用电负荷的正调峰特性，起到削峰的作用。
- 2、运行方式较为灵活，相对于分布式风电、光伏可以更方便地进行无功和电压控制，参加电网频率调节也更容易实现。
- 3、建设周期短，环境适应能力强，不需要水源、燃煤运输等原料保障，运行成本低，便于集中管理，受到空间的限制小，可以很容易地实现扩容。

新能源接入电力系统的方式：

一、新能源集中式并网

- 缺点：

- 1、需要依赖长距离输电线路送电入网，同时自身也是电网的一个较大的干扰源，输电线路的损耗、电压跌落、无功补偿等问题将会凸显。
- 2、大容量的风电场、光伏电站由多台变换装置组合实现，这些设备的协同工作需要进行统一管理，目前这方面技术尚不成熟。
- 3、为保证电网安全，大容量的集中式光伏接入需要有低电压穿越(LVRT)等新的功能，这一技术往往与孤岛保护存在冲突。

新能源接入电力系统的方式：

二、分布式发电（Distributed Generation, DG）

- ◆ 区别于传统的“大机组、大电网、高电压”

- ◆ 范围：

- ◆ 通常是指发电功率在几千瓦至数百兆瓦（也有的建议限制在30~50兆瓦以下）的小型模块化、分散式、布置在用户附近的高效、可靠的发电单元。

- ◆ 涵盖：

- ◆ 以液体或气体为燃料的内燃机、微型燃气轮机、太阳能发电（光伏电池、光热发电）、风力发电、生物质能发电等，甚至也包括小水电（Hydro Power）。

分布式发电的概念

- 其它称谓：
 - 英属国家：嵌入式发电（Embedded Generation）
 - 北美：分散式发电（Dispersed Generation）
 - 欧亚其它国家：非集中式发电（Decentralized Generation）
- 概念：
 - 为满足用户特定的需要、支持现存配电网的经济运行或同时满足这两方面要求，在用户现场或靠近用户现场所配置的功率较小、与环境兼容的发电系统。

2、国内外为什么要大力发展分布式发电？“大机组、大电网、高电压”效率岂非更高？

分布式发电的优点

- 分布式发电的六大**优点**:
 - (1) 各**电源相互独立**，安全可靠比较高；
 - (2) 可**弥补大电网安全稳定性的不足**，在意外发生时继续供电；
 - (3) 可对区域电力的质量和性能进行**实时监控**；

分布式发电的优点

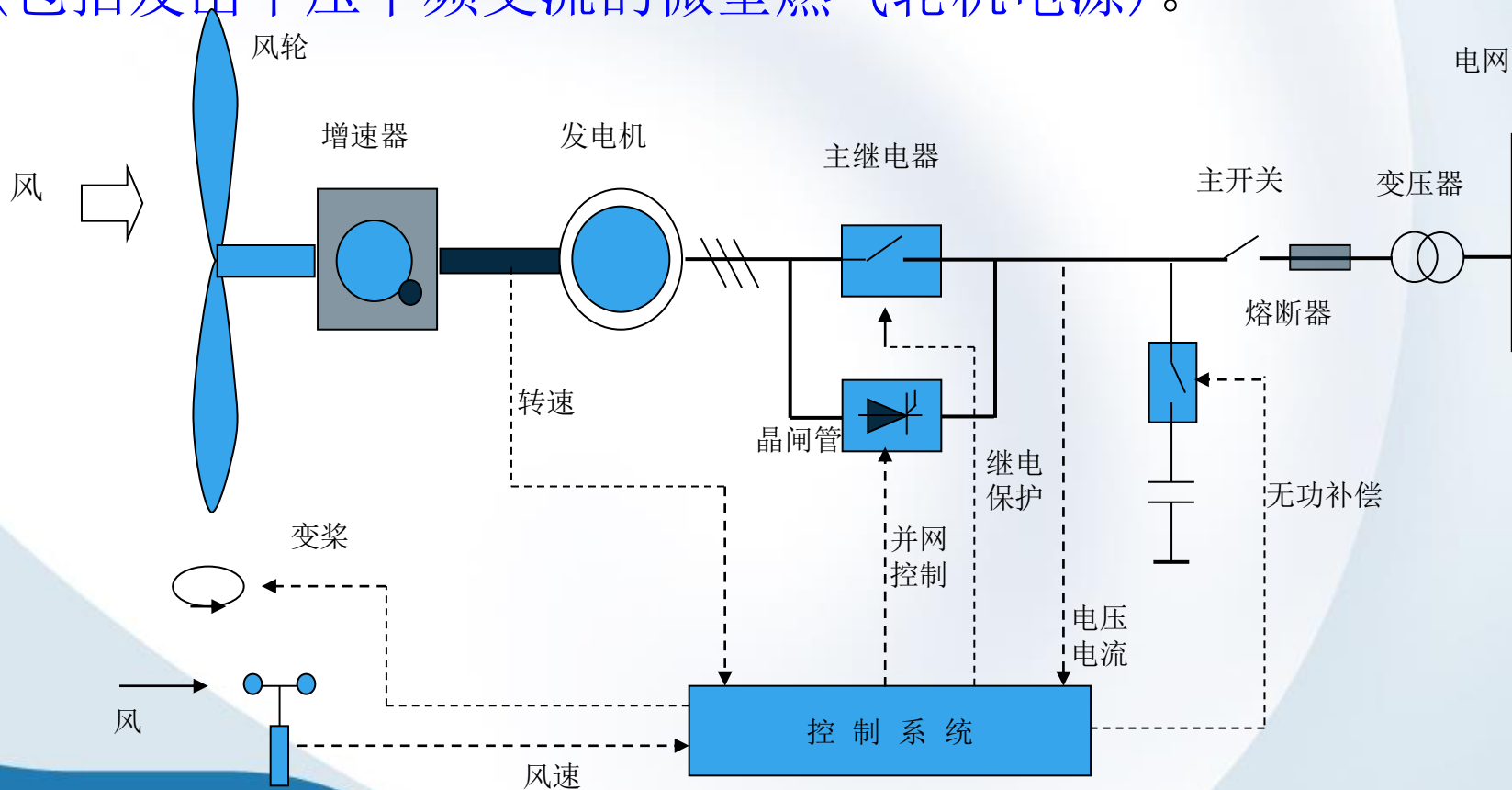
- (4) 输配电损耗很低，无需建配电站，可降低附加的输配电成本；
- (5) 可满足特殊场合需求；
- (6) 调峰性能好，操作简单，启停快速，便于实现全自动。

3、出力随机、非工频运行的分布式发电怎么与系统互联，即怎么接入传统工频交流电力系统？



1.2 新能源发电的并网及拓扑结构

新能源电源形式的多样性，一次能源的随机性、波动性和间歇性，导致其所发出电能的频率不一定为精确的工频交流，因此，大多是通过电力电子换流设备变换为工频后接入电力系统(包括发出中压中频交流的微型燃气轮机电源)。



典型的风电机组并网示意图

DG并入大电网:

- 传统同步发电机的同期并网:
 - 发电机同期并网的时候需要考虑以下条件:
 - 1、待并机组与系统电压相等或接近相等;
 - 2、待并机组与系统频率相等或接近相等;
 - 3、待并机组与并网母线的相位相同;
 - 4、相序相同;
 - 5、波形一致。
- 新能源并网的要求也同样需要上述条件:
 - 并且, 不同的是, 电力电子器件的调整和控制十分迅速。

DG接入配电网:

- 与配电网并网时，可以按系统接受的恒功率因数或恒无功功率输出方式运行；
- 公共连接点（Point of Common Coupling, PCC）的电压调节一般由电网调节；
- 采用同期或准同期并网时，不应造成电压过大的波动；
- 接地与保护方案与原配电网协调；
- 达到一定容量的DG必须向配电网的调度控制中心提供P、Q和连接状态等信息；
- DG应配备继电器，检测何时解列，并在合适条件下孤岛运行。

一、风力发电并网拓扑

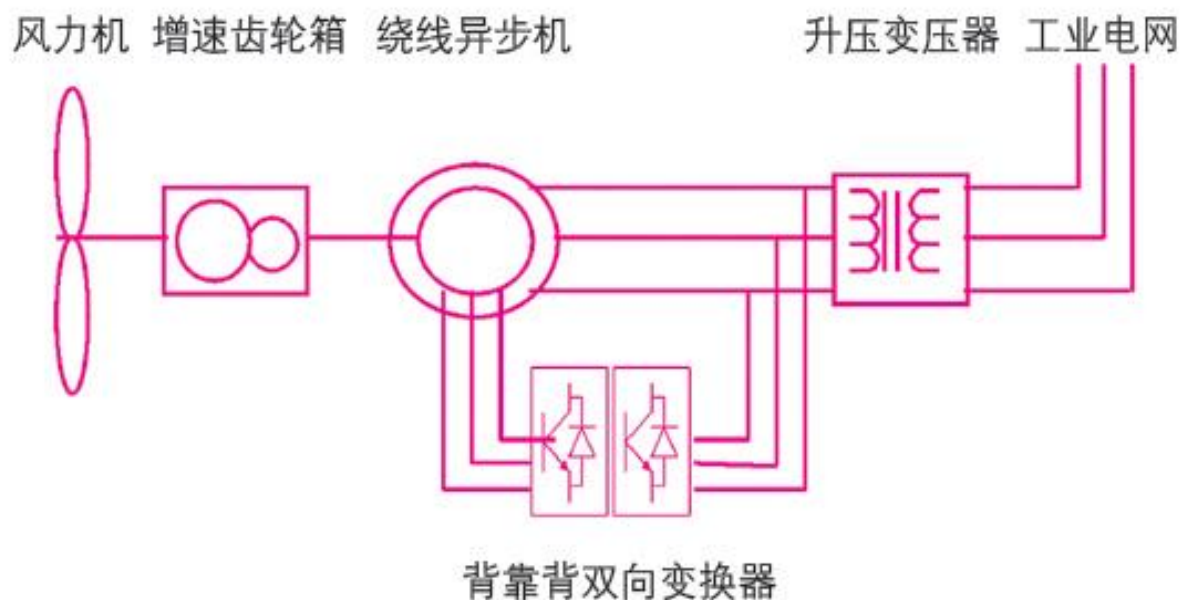
■ 双馈风机DFIG（第二章详述）

- 是一种绕线式感应发电机，**双馈异步发电机的定子绕组直接与电网相连，转子绕组通过变流器与电网连接**，转子绕组电源的频率、电压、幅值和相位按运行要求由变频器自动调节，机组可以在不同的转速下实现恒频发电，满足用电负载和并网的要求。

一、风力发电并网拓扑

■ 双馈风机DFIG

- 需装齿轮箱；
- 对故障敏感。



双馈异步风力发电机并网结构图

一、风力发电并网拓扑

■ 永磁直驱风机PMSG

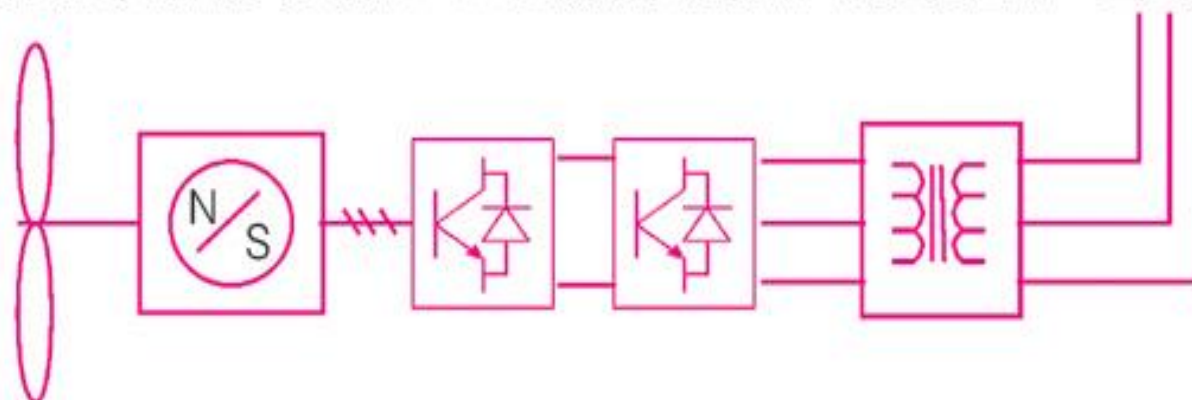
- 一般发电机要并网必须满足相位、幅频、周期同步。
- 如我国电网频率为50Hz，这就表示发电机要发出50Hz的交流电。转速、磁极对数、与频率的关系是 $n=60f/p$ 。所以当极对数恒定时，发电机的转速是一定的。所以一般双馈风机的发电机额定转速为1800r/min。而叶轮转速一般在十几转每分。这就需要在叶轮与发电机之间加入增速箱。

一、风力发电并网拓扑

■ 永磁直驱风机PMSG

- 不需要齿轮箱，低电压穿越能力强；
- 变流器容量大，永磁材料昂贵。

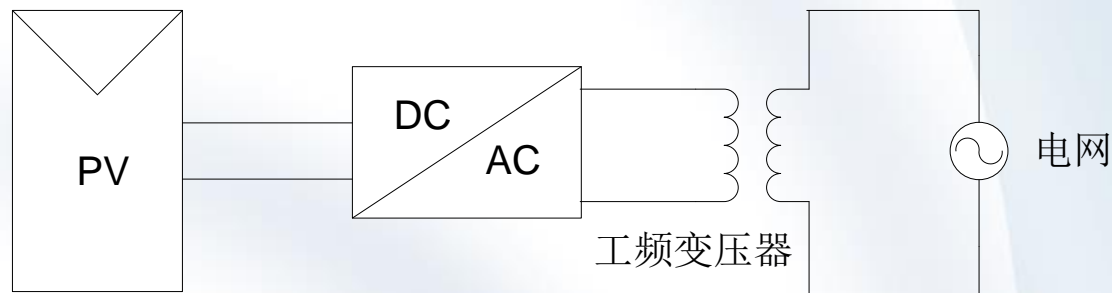
风力机 永磁同步发电机 PWM整流器和逆变器 升压变压器 工业电网



永磁直驱同步风力发电机并网结构图

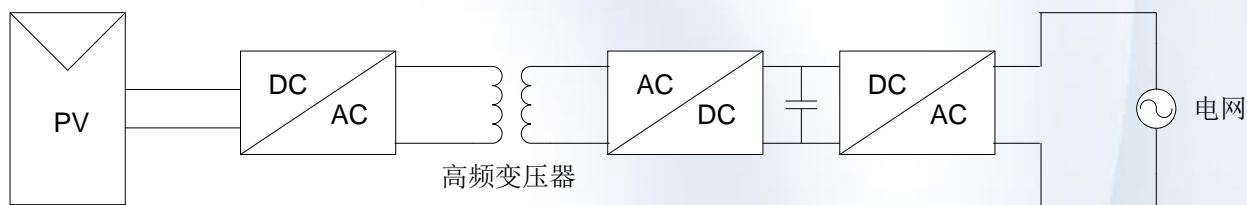
二、光伏发电并网拓扑

- 隔离型
— 工频

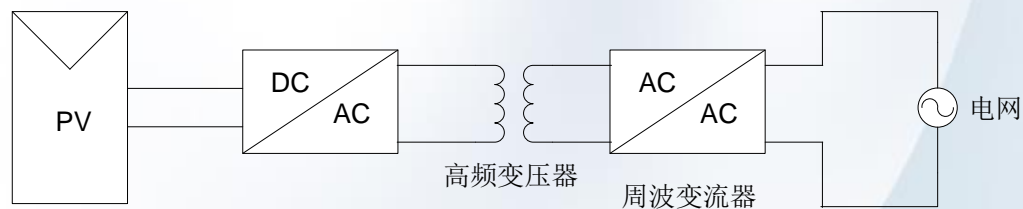


工频隔离型光伏并网逆变器结构图

- 高频



a) DC-DC变换型



b) 周波变换型

高频隔离型光伏并网逆变器结构图

工频和高频隔离的优缺点：

- 隔离是指：隔离直流和交流电路；

— 缺点：

- 工频变压器体积大、质量大，约占逆变器总重量的50%左右，导致逆变器尺寸很大；
 - 而且工频变压器增加了系统损耗、运行成本，增大运输、安装难度。
-
- 因此，体积和质量较小的高频变压器应运而生，用来将光伏阵列与交流电网进行隔离。

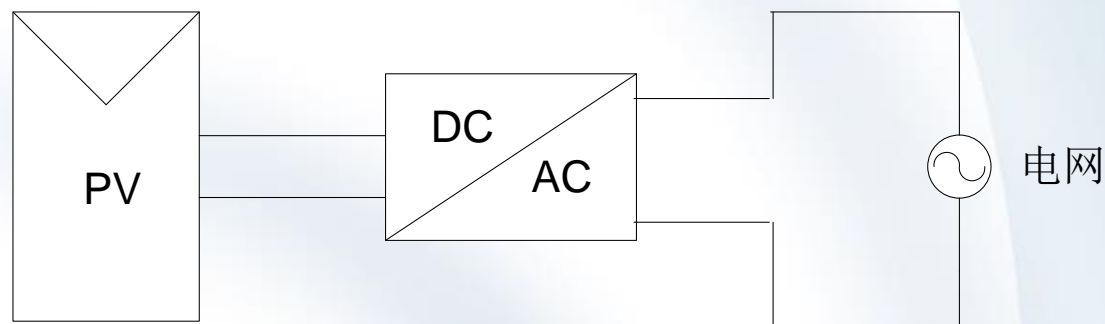
隔离型---->非隔离型:

- 隔离型并网系统中，不管工频还是高频变压器：
 - 电能-磁能、磁能-电能转化，必然导致能量损耗；
 - 数千瓦的小容量变压器能量损失可达5%甚至更高。
- 非隔离型：
 - 结构简单、质量变轻、成本降低、效率较高。

二、光伏发电并网拓扑

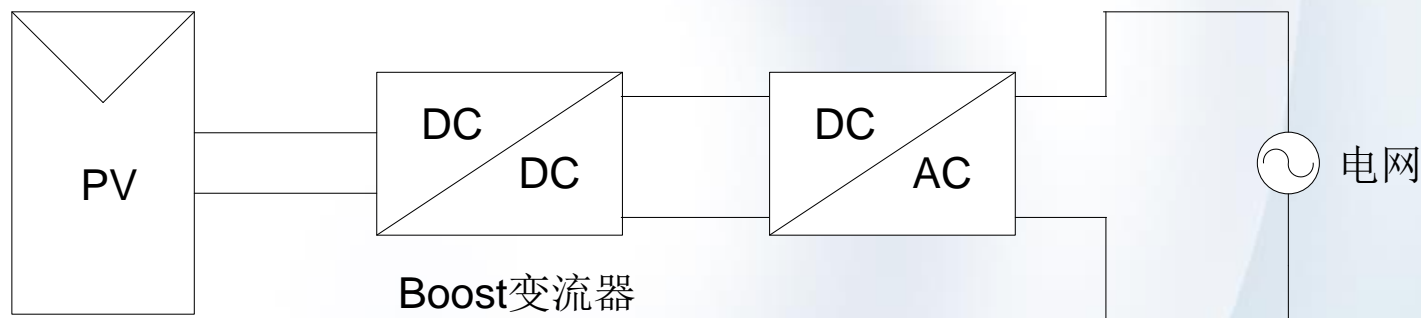
- 非隔离型

- 单级



单级不隔离型光伏并网逆变器结构图

- 多级



多级不隔离型光伏并网逆变器结构图

不隔离的优缺点：

- 优点：

- 提高效率，可直接让逆变器工作在工频模式，直接耦合电网；
- **Boost**变换器为升压变换器，可使光伏阵列工作在一个较宽的电压范围内，因而使直流侧的电压配置更灵活，驱动较简单；
- 可以提高最大功率点跟踪的精度；

- 缺点：

- 光伏组件需要较高绝缘等级。

非隔离型需要注意的问题：

- 大面积光伏电池组件，不可避免地地与地之间存在较大的分布电容，因而会产生对地的共模漏电流。
- 无工频和高频隔离变压器，容易向电网注入直流分量。
- 需采取适当的控制和保护措施以保证运行的可靠性与安全性。

课后阅读

- 参考书目4：张兴，曹仁贤. 《太阳能光伏并网发电及其逆变器控制》
 - 第三章
 - 第四章

三、新能源发展及并网政策

- 发展障碍

- 成本障碍（远高于火电、市场较小）
- 技术障碍（缺乏自主研发创新、关键技术）
- 产业障碍（集中程度低、产业布局乱）
- 融资障碍（产业新、缺乏信用）
- 政策障碍（政府鼓励、竞争机制、补偿机制、交易机制、管理服务机制）
- 体制障碍（分散在多个部门）

三、新能源发展及并网政策

- 经济上

- 政策:

- 上网电价补贴，如光伏：¥1.09/kWh
 - 税收

- 研发、生产、消费的投资

- 技术上

- 电力系统如何在电网输电侧、配电侧接入新能源:

- 新能源的运行条件、规模等
 - 技术上更细化的要求，如LVRT等

