



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 3

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

新能源对系统运行的影响

3.1 新能源电力系统的特点

掌握分布式发电概念，新能源区别于传统电源的运行特性。

3.2 分布式发电并网对系统运行的影响

熟悉新能源对系统规划和运行的影响。

3.3 风电并网后电力系统电压及无功补偿

掌握风电对系统节点电压的影响及无功补偿。

3.1 新能源电力系统的特点

一、新能源集中式并网

◆ 新能源并网方式

- ◆ 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。

3.1 新能源电力系统的特点

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，比如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，参与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，受空间的限制小，可以很容易地实现扩容。

3.1 新能源电力系统的特点

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。

二、分布式发电 (Distributed Generation, DG)

◆ 区别于传统的“高电压、大机组、大电网”

◆ 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

◆ 多种称谓：

- ◆ 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。

◆ 思考题1:

- ◆ 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

◆ 分布式发电的优点:

(1) 各电源相互独立，可靠性比较高；

(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，无需额外建配电站，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。

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。

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：

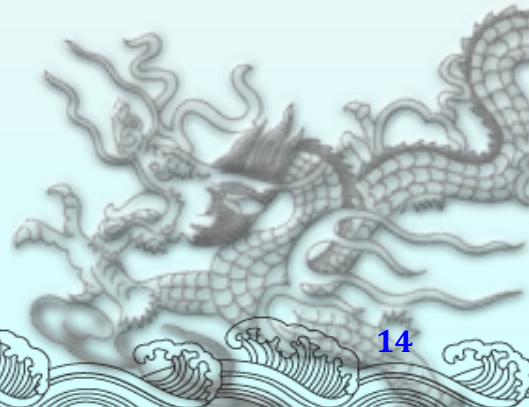
- ◆ 上网电价补贴，如光伏：¥1.09/kWh
- ◆ 税收

◆ 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



四、新能源电力系统的特点

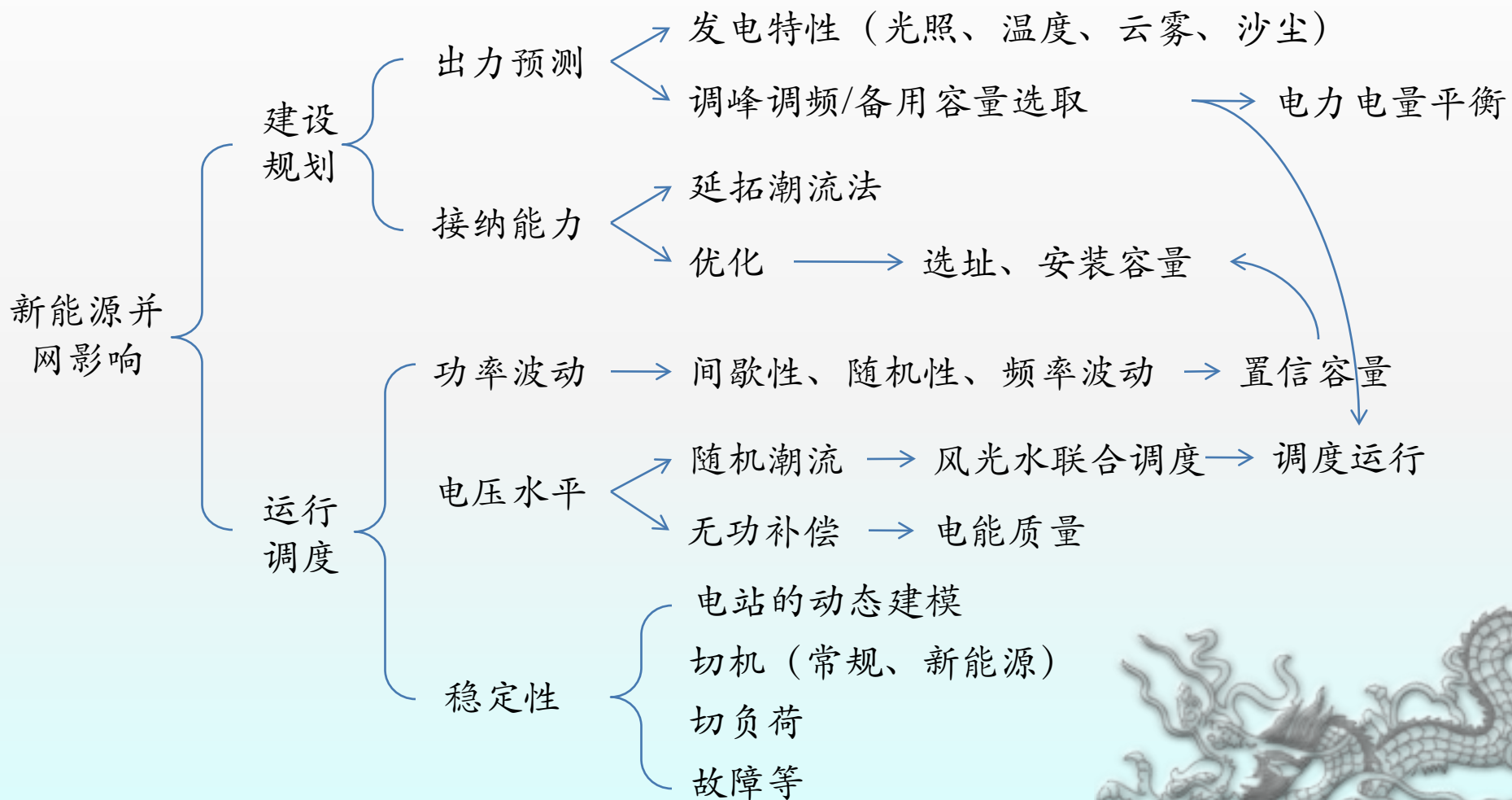
新能源如风力发电、光伏发电的特点：

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有较大的差别。



3.2 新能源并网对系统的影响



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、新能源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。

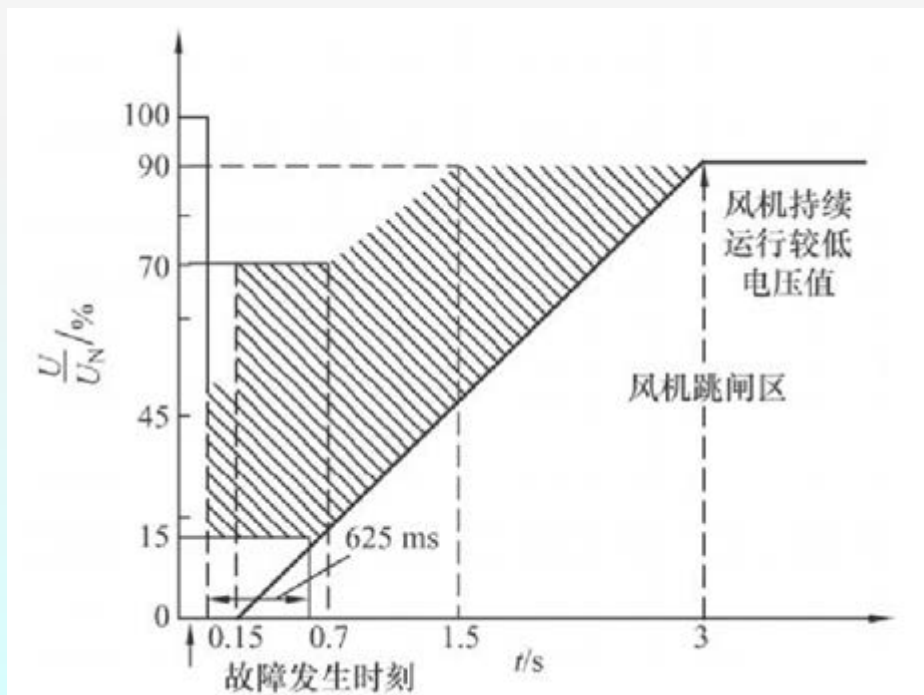
◆ 2. 系统的电压稳定性问题

◆ 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.低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)

- ◆ **定义**: 指在风机（或其他新能源机组）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。



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。

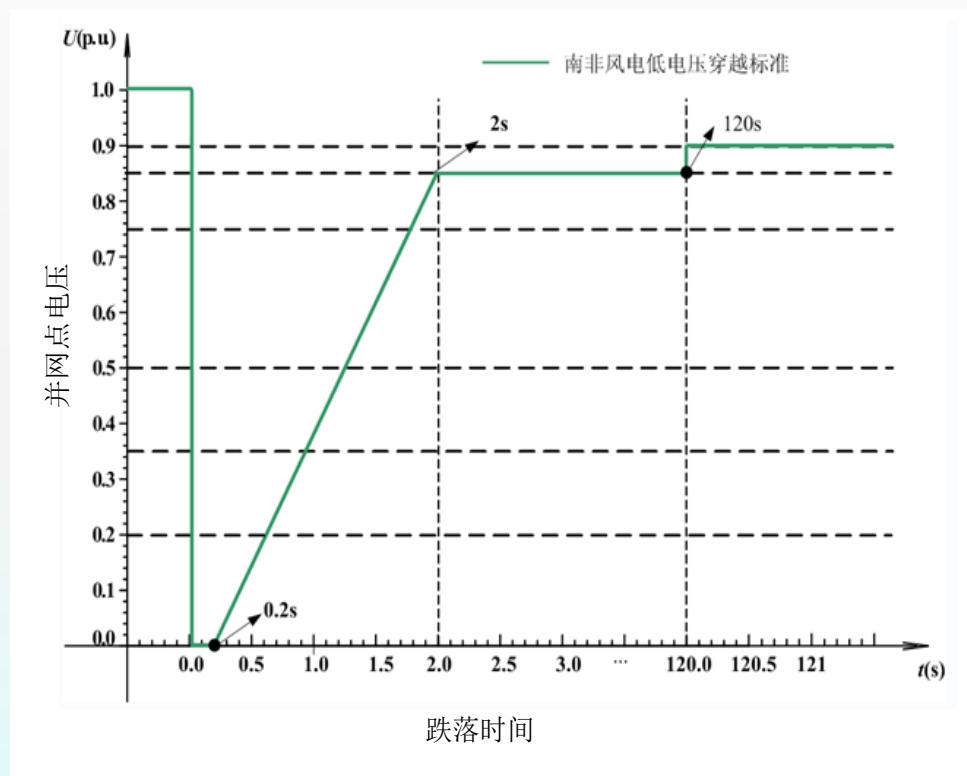
零电压穿越

- ◆ 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

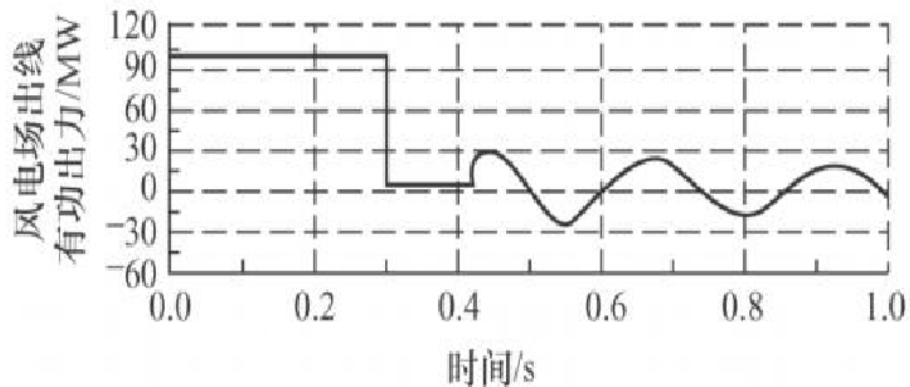
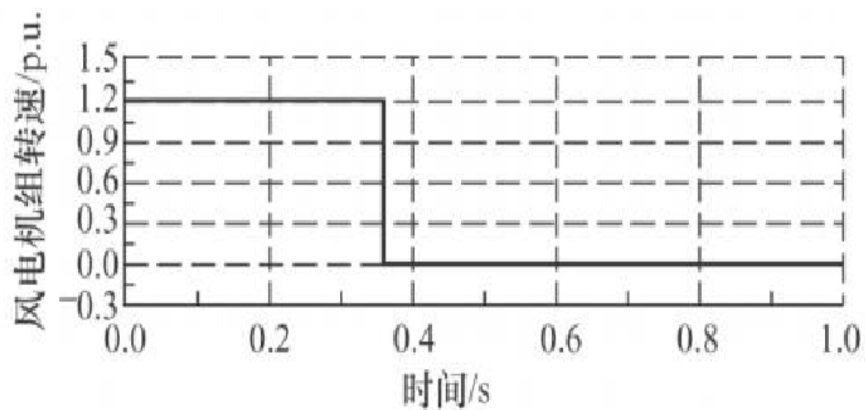
零电压穿越

◆ 标准中的相关要求:

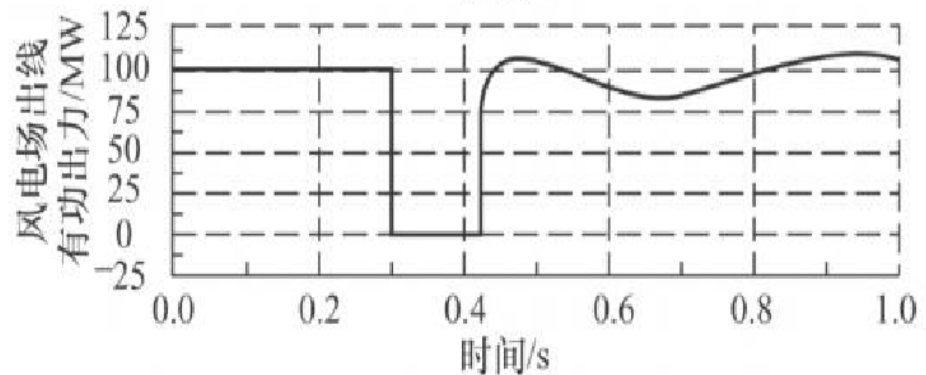
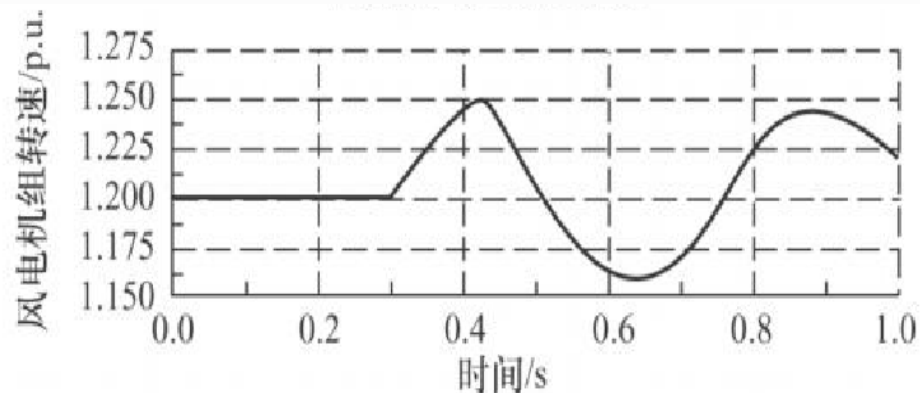
- ◆ 1) 风电机组在电压跌落至**0V**可以保证不间断运行**200ms**;
- ◆ 2) **2s**内能够恢复到额定电压的**85%**;
- ◆ 3) 风电机组在零电压穿越过程中具备**向电网输出无功功率以支撑电网电压**的能力。



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



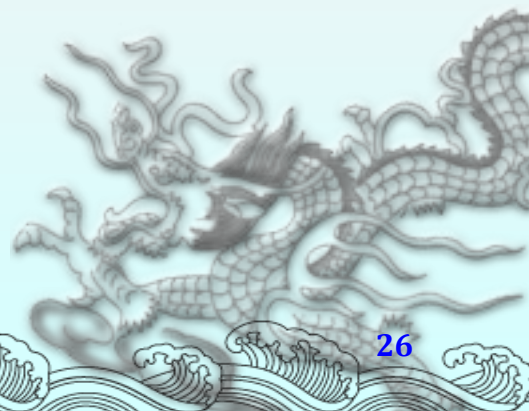
(b) 有低电压穿越能力

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。欲分析风电、光伏发电的出力**波动性**对调度运行的影响，尤其是对电力电量平衡的影响，必须首先提高风电、光伏发电的输出功率预测精度。

◆ 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。但是如果如果没有合适的大功率存储系统，新能源就对系统的调峰效应就不一定为正面的影响。

◆ 3) 调频问题

- ◆ 大容量的风电、光伏发电系统接入电网，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，是否会造造成调频机组的频率响应问题，需要深入分析。

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

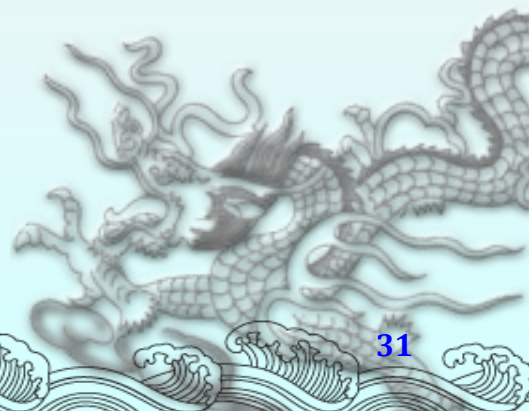
◇ 电压偏差

- ◇ 风速随机变化
- ◇ 并网和脱网、补偿电容器的投切等操作

◇ 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

◇ 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气设备不能正常工作，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速的波动、塔影效应、尾流效应影响和风力机机械特性等。

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

◆ 3.谐波污染

- ◆ 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。

变速恒频风电机组通过整流和逆变装置接入系统，如果电力电子装置的切换频率恰好在产生谐波的范围內，则也会产生很严重的谐波问题。



3.3 风电并网后电力系统电压及无功补偿

一、传统电力系统的电压管理与调整

◇ 1. 电力系统允许的电压偏移：

- ◆ 一般控制为 $\pm(5\sim 10)\%U_N$ ；

- ◇ 35kV及以上供电电压正负偏移的绝对值之和不超过10%；

- ◇ 10kV及以下在 $\pm 7\%$ 以内。

◇ 2. 中枢点的电压管理

- ◆ **电压中枢点的概念**：一般选择系统内装机容量较大的发电厂高压母线，容量较大的变电所低压母线，以及有大量地方负荷的发电机母线作为电压中枢点。

3. 电压波动的影响

① 电压过高的危害

- ◆ 影响电气设备的绝缘；
- ◆ 电动机、变压器的铁心饱和，铁损增大，温度升高，寿命缩短；
- ◆ 白炽灯使用寿命缩短。

② 电压过低的危害

- ◆ 发电机有功出力下降；
- ◆ 降低变压器传输的功率；
- ◆ 异步电动机转速下降，定子、转子绕组发热；
- ◆ 电炉等电阻性设备的功率急剧下降；
- ◆ 系统运行稳定性变差，甚至可能导致“系统电压崩溃”。

因此，必须要针对电压的波动进行电压调整。

◆ 4. 电力系统中枢点电压调整的三种方式：

- ◆ **顺调压**：是指在最大负荷时适当降低中枢点电压，但不低于102.5%倍额定电压，最小负荷时适当加大中枢点电压的电压调整方式，但不高于107.5%倍额定电压。
- ◆ **逆调压**：是指在最大负荷时，提高系统电压中枢点电压至105%倍额定电压以补偿线路上增加的电压损失，最小负荷时降低中枢点电压至额定电压以防止受端电压过高的电压调整方式。
- ◆ **常调压**（亦称**恒调压**）：是指无论负荷如何变动，系统电压中枢点电压基本保持不变的电压调整方式，一般保持中枢点电压在102~105%倍额定电压。

◆ 5. 传统电力系统电压调整方法

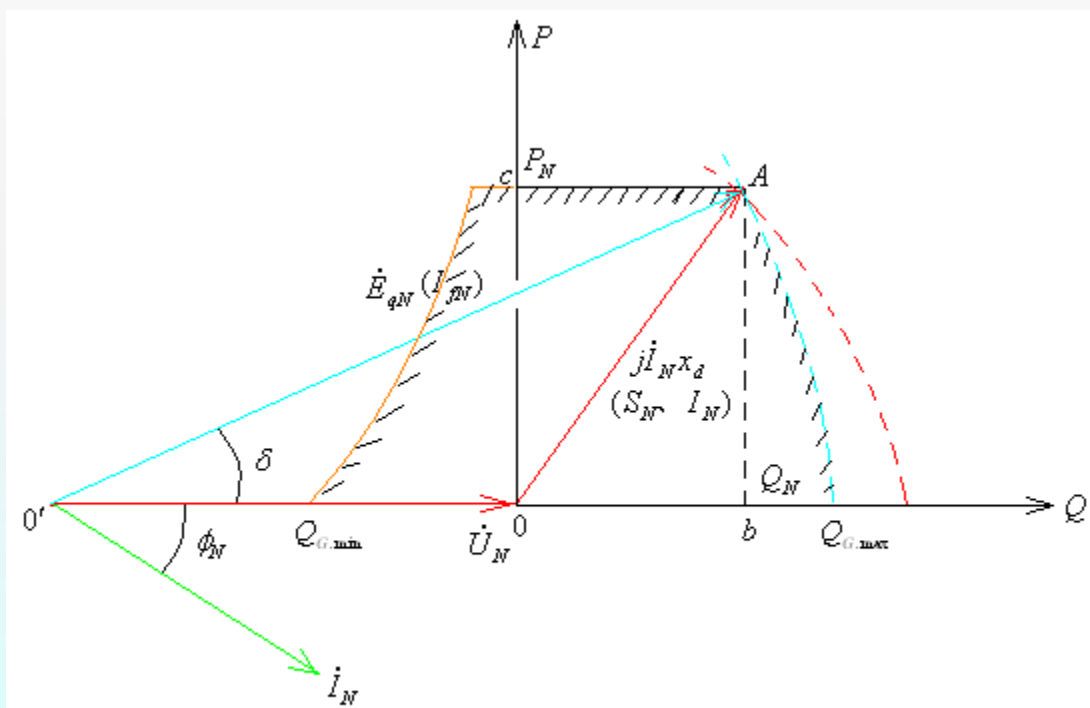
- ◆ 改变**发电机机端电压**（不需增加额外的设备）
- ◆ 调节**变压器分接头**（需要无功充足，无载调压、有载调压变压器）
- ◆ **并联无功补偿**（调相机、电容器、SVC、STATCOM）
- ◆ **串联电容器补偿**（改变等值电路的总电抗，是电压损耗减少，达到调压的目的）

电容器、调相机和静止无功补偿器SVC的性能比较表

性能	电容器	调相机	静止无功补偿器		
			TCR型	TSC型	SR型
调节范围	超前	超前/滞后	超前/滞后	超前	超前/滞后
控制方式	不连续	连续	连续	不连续	连续
调节灵活性	差	好	很好	好	差
启动速度	中等	慢	很快	快	快
反应速度	快	慢	快	快	快
调节精度	差	好	很好	差	好
产生高次谐波	无	少	多	无	少
电压调节效应	负	正	正（一定范围）	负	正（一定范围）

◆ 6.同步发电机的无功运行极限

- ◆ 励磁电流 $O'A$ 限制
- 发电机的无功出力;
- ◆ 定子电流 OA 限制;
- ◆ 原动机出力 P_N 限制;
- ◆ 进相吸收无功限制。



隐极机运行极限图

◇ 7.无功功率的平衡

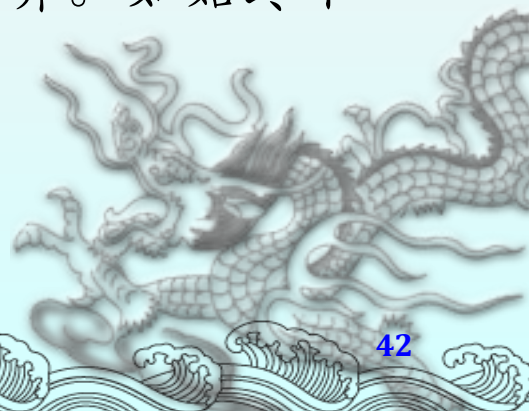
- ◆ 1) 无功电源应与无功负荷、无功损耗之和相等：

$$\begin{cases} \sum Q_{GC} - \sum Q_L - \Delta Q_{\Sigma} = 0 \\ \sum Q_{GC} = \sum Q_G + \sum Q_{C1} + \sum Q_{C2} + \sum Q_{C3} \\ \Delta Q_{\Sigma} = \sum \Delta Q_{Ti} + \sum \Delta Q_{X_Li} - \sum \Delta Q_{X_b i} \end{cases}$$

- ◇ 要保持电力系统在额定电压水平下运行，就必须保证在额定电压水平下的无功功率平衡；
- ◇ 无功源：同步发电机、各种无功补偿装置；
- ◇ 无功损耗：变压器、线路电抗，减去线路电容的充电功率。

◆ 2) 电力系统应定期进行无功功率平衡计算（了解）：

- ① 参照过去运行资料确定未来、代表日预想有功负荷曲线；
- ② 确定出现无功功率日最大负荷时系统有功负荷的分配；
- ③ 给定无功电源容量、配置以及某些枢纽点的电压水平；
- ④ 进行潮流分布计算；
- ⑤ 根据潮流计算，统计无功平衡关系中的各项数据，判断系统无功功率能否平衡；
- ⑥ 如不能平衡，调整假设的给定条件，重新计算。如始终不能平衡，则考虑增加无功电源。



◇ 3) 无功备用容量:

◇ 为应付计划外的无功负荷、无功负荷的波动等，电力系统无功电源除满足预测最大无功负荷需求外，还应当留有一定的备用容量，否则当负荷增大时系统电压水平将得不到保障。

◇ 无功备用容量通常取最大无功负荷的7%~8%。

◇ 8.无功功率的经济分配

- ◆ ① **无功电源的最优分布**：电力系统的无功电源是按满足系统最大无功负荷需求，并留有一定备用容量配置的，当实际无功负荷小于最大无功负荷时，如何安排各无功电源的出力？就是无功电源的最优分布问题。
- ◆ ② **无功负荷的最优补偿**：电力系统无功电源容量不能满足系统最大负荷需求的情况下，是否还需要增加无功补偿装置？如果需要增加，则增加的无功补偿装置应放在何处呢？就是无功负荷的最优补偿问题。

◆ 1) 无功电源最优分布的目标函数及约束条件

◆ 目标函数
$$\min_i \Delta P_\Sigma = \Delta P_\Sigma(Q_{G1}, Q_{G1} \cdots Q_{Gn})$$

◆ 约束条件

◆ 等式约束条件:
$$\Sigma Q_{Gi} - \Sigma Q_{Li} - \Delta Q_\Sigma = 0$$

◆ 不等式约束条件:
$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max}, U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}$$

◆ 无功电源最优分配准则 (不计不等式约束条件)

◆ 转换为无约束极值问题, 拉格朗日函数:

$$L^* = \Delta P_\Sigma(Q_{Gi}) - \lambda \left(\sum_{i=1}^n Q_{Gi} - \sum_{i=1}^n Q_{Li} - \Delta Q_\Sigma(Q_{Gi}) \right)$$

◆ 目标函数取得极值的必要条件：

$$\begin{cases} \frac{\partial L^*}{\partial Q_{Gi}} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{Gi}} - \lambda \left(1 - \frac{\partial \Delta Q_{\Sigma}}{\partial Q_{Gi}} \right) = 0, & i = 1, 2, \dots, n \\ \frac{\partial \Delta L^*}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^n Q_{Gi} - \sum_{i=1}^n Q_{Li} - \Delta Q_{\Sigma} = 0 \end{cases}$$

◆ 即：在不计不等式约束条件的情况下，无功功率电源的最优分配原则为在满足无功功率平衡的条件下，按等网损微增率准则分布。

◆ 如果有不等式约束被破坏，将该无功源出力定为其越限值，其他无功源继续按上述原则分配。

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{G1}} \times \frac{1}{1 - \frac{\partial \Delta Q_{\Sigma}}{\partial Q_{G1}}} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{G2}} \times \frac{1}{1 - \frac{\partial \Delta Q_{\Sigma}}{\partial Q_{G2}}} = \dots = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{Gn}} \times \frac{1}{1 - \frac{\partial \Delta Q_{\Sigma}}{\partial Q_{Gn}}} = \lambda$$

◇ 2) 无功负荷的最优补偿

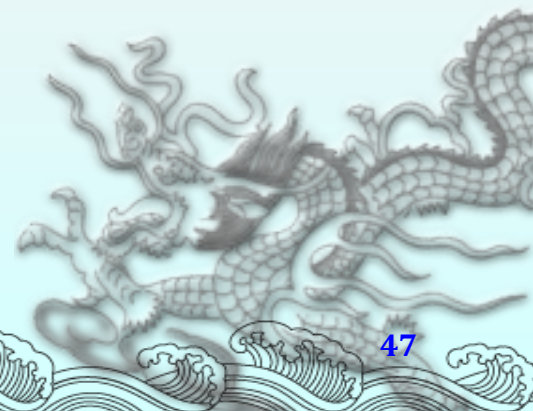
- ◇ 最优补偿容量的确定;
- ◇ 最优补偿设备的分布;
- ◇ 最优补偿顺序。

◇ 目标函数：装设无功补偿设备后电网电能损耗减小节约的费用与增加无功补偿设备所支出的费用之差取得最大值。

C_e —增加无功补偿装置后减少的电能损耗费用

C_c —增加无功补偿装置后增加的年运行费用

$$\begin{cases} \max C = \max_i [C_e(Q_{ci}) - C_c(Q_{ci})] \\ C_e(Q_{ci}) = \beta(\Delta P_{\Sigma 0} - \Delta P_{\Sigma})\tau_{\max} \\ C_c(Q_{ci}) = (\alpha + \gamma)K_c Q_{ci} \end{cases}$$



◆ 最优补偿原则：

- ◆ **最优网损微增率准则**：应在网损微增率为负值，且小于 γ_{eq} 的节点设置无功补偿设备。设置的容量则以补偿后该点的网损微增率仍为负值，且仍不大于 γ_{eq} 为限。
- ◆ 而设置补偿设备节点的先后顺序，则以网损微增率的大小为序，首先应从网损微增率最小的节点开始。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial Q_{ci}} = -\beta\tau_{\max} \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} - K_C(\alpha + \gamma) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} = -\frac{(\alpha + \gamma)K_c}{\beta\tau_{\max}}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} \leq -\frac{(\alpha + \gamma)K_c}{\beta\tau_{\max}} = \gamma_{eq}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{array} \right.$$

二、风力发电的无功特性及无功补偿

◆ 1. 风电场的无功特性

- ◆ 目前的风力发电机组主要为异步风力发电机组，其特点是定子直接与电网相连，转子侧需要外部装置提供励磁，**本身无类似于同步发电机励磁调节器的励磁装置**；
- ◆ **因此需要从电网吸收无功功率或采用机端并联电容器组、动态无功补偿装置等提供无功功率。**
- ◆ 风电场的无功功率特性与异步风力发电机组的无功功率特性和运行特性紧密相关。

- ◆ 由异步发电机的RX模型：

$$\begin{cases} P_C = \frac{-U^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_k^2} \\ s = \frac{U^2 r_2 - \sqrt{U^4 r_2^2 - 4P_C^2 x_k^2 r_2^2}}{2P_C x_k^2} \\ Q_C = \frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_2 x_m s} P_C \end{cases}$$

- ◆ 异步发电机本身的输出有功、无功功率公式可以看出，考虑到 $s < 0$ ，其**发出的有功功率为正**，**发出的无功功率为负**，因此异步发电机在运行时发出有功功率并吸收无功功率，**其功率与机端电压 U 的平方成函数关系，且是转差 s 的函数**。

◆ 2. 风电接入对系统电压的影响

- ◆ 风电机组的无功特性：风力发电机组多采用异步发电机，发电机组需要**从电网中吸收无功功率主要用于建立激磁磁场**，进而向电网输出有功功率；
- ◆ 对电压的影响：由于输出的有功功率随着**风速的波动**以及系统运行方式的变化而不断变化，**导致吸收的无功功率也会相应的波动变化**，进一步造成风电场母线电压的波动，从而影响系统的电压稳定。

风电场电压稳定性降低的原因**主要是因为风电场及其等值线路作为一个无功负荷需要吸收无功所致。**

- ◆ 当风电场向系统输送有功功率 P 时，在输电线的电阻上产生正的电压降；
- ◆ 而风电场从系统吸收的感性无功功率 Q ，在输电线路的电抗上则会产生负的电压降。
- ◆ 当**风电场的功率因数不同，以及输电线路的 R/X 比值不同时**，风电场的端电压相对于并网节点的电压偏差就不同。

$$\begin{cases} \Delta U_0 = \frac{P_0 R + (-Q_0) X}{U_0} \\ U_1 = U_0 + \frac{P_0 R + (-Q_0) X}{U_0} \end{cases}$$

◆ 3. 风力发电系统的无功补偿方法（其他新能源同样适用）

◆ （1）风电无功需求的特点：

1) 风电机组需要从电网吸收无功功率以建立磁场：进一步向电网输出有功功率，如果没有电网的无功作为基础，异步发电机是没有能力发电的；

- ◆ 风电场的无功变化在满发时需抬高风机出口电压以满足输送功率的要求；
- ◆ 在并网瞬间需要较大幅度地降低出口电压；
- ◆ 而在停风状态下如需保持与电网的联接也需要从系统吸收无功。

◆ (1) 风电无功需求的特点:

2) 并网升压变压器损耗的影响: 由于风电场设备长期并网, 无论是否发电, 变压器设备都要向系统吸收一定的无功, 其无功损耗大约是变压器容量的10%~15%;

3) 风电场内部线路损耗的影响: 当风机本身的无功补偿不足以补偿这些无功变化时, 就需从电网吸收无功, 这些无功在流经线路时也会引起线路损耗。风电场中的风机是分散排布的, 其间隔距离较大, 因此从系统吸收无功所经的线路较长, 又会增加一定的线损。

- ◆ (2) 风电场补偿容量的确定:
 - ◆ 1) 通过无功补偿度确定补偿容量
(标准规定: 网络中无功补偿度不应低于0.7)

$$W_a = \frac{Q_c}{P_n}$$

- ◆ 2) 从调整功率因数需要确定补偿容量
(在发电机出口并联补偿电容, 使得风电的功率因数维持在0.97~1.00之间)

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + (Q_c + Q_{cl} + Q_e - Q_1)^2}}$$

- ◆ (3) 风电场的无功补偿方法:
 - ◆ 并联电容器组无功补偿
 - ◆ 静止无功补偿器 (SVC)
 - ◆ 静止无功发生器 (STATCOM或称SVG)

第三讲 小结

- ◆ 新能源运行的特点
 - ◆ 分布式发电的概念及优点
- ◆ 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
 - ◆ 谐波
- ◆ 风电的无功运行特性及对系统电压的影响
- ◆ 风电的无功需求及无功补偿方法

