



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 14

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

第五章 新能源电力系统规划

5.1 负荷预测与新能源发电功率预测

熟悉电力负荷曲线，掌握新能源的出力预测技术。

5.2 新能源发电的容量可信度概念

熟悉含新能源发电系统的可靠性计算方法和容量可信度指标。

5.3 新能源穿透功率极限分析

了解新能源的穿透功率极限分析方法和简单电源规划方法。

5.4 新能源并网后电力系统调峰及消纳能力计算

了解新能源对系统调峰、备用，消纳能力分析计算。

5.5 新能源电力系统可靠性计算

熟悉传统电力系统及含新能源电力系统可靠性计算。

5.6 新能源发电效益与工程经济分析

了解新能源发电自身效益，熟悉工程经济分析基础方法。

5.4 新能源并网后电力系统调峰及消纳能力计算

- 意义

- 新能源发展中存在诸多工程实际问题，如风电等缺乏统一规划、一些地区新能源投资盲目、新能源带来的调峰能力不足，这些问题都给电网可再生能源优先的调度政策带来很大的困难，因此研究新能源并网后对电力系统调峰的影响尤为重要。

1. 电力电量平衡

• 1) 电力平衡

- 电力系统的基本任务是安全、可靠、经济、灵活地向用户提供高质量的电能。
- 发电系统的可靠性主要取决于发电机组的可用容量与负荷的平衡情况，即供应与需求之间的平衡。
- 电力平衡方程式：

$$\sum_{j=1}^{N_H} C_{Hj}^{(i)} + \sum_{k=1}^{N_r} C_{Tk}^{(i)} = P_{\max} (1+r) \quad (i=1,2,\dots,12)$$

$$\sum_{j=1}^{N_H} C_{Hj}^{(i)} + \sum_{k=1}^{N_r} C_{Tk}^{(i)} = P_{\max} + C_r \quad (i=1,2,\dots,12)$$

◆进行电力平衡的主要目的：

- ◆确定系统所需要的发电设备容量；
- ◆确定各类发电站的建设规模及装机进度；
- ◆确定与其他电力系统联网的合理性。

◆负荷的最大功率应计入网损和厂用电

- ◆网络损耗包括输电线路及变压器中的损耗，一般可按最大功率的6%~10%估计；
- ◆厂用电应按电站类型分别计算：
 - 水电站：低于1%
 - 火电厂：出力的5%~8%
 - ◆核电站：4%~5%

• 2) 电量平衡

— 一般应逐年逐月进行电量平衡，其主要目的是：

- 确定各代表水文年系统中各电站的发电量或发电设备利用小时数；
- 确定水电站电量的利用程度，论证水电站装机容量的合理性；
- 确定与其他电力系统交换能量的情况。

— 电量平衡方程式：

$$E_d^{(i)} = \sum_{j=1}^{N_H} E_{Hj}^{(i)} + \sum_{k=1}^{N_r} E_{rk}^{(i)} \quad (i = 1, 2, \dots, 12)$$

• 3) 电力电量平衡主要分析和研究的问题:

- (1)确定电力系统需要的发电设备容量，确定规划设计年度内逐年新增的装机容量和退役机组容量。
- (2)确定系统需要的备用容量，研究在水、火电厂之间的分配。
- (3)确定系统需要的调峰容量，使之能满足设计年不同季节的系统调峰需要。
- (4)合理安排水、火电厂的运行方式，充分利用水电，使燃料消耗最经济，并计算系统需要的燃料消耗量。
- (5)确定各代表水文年各类型电厂的发电设备利用小时数，检验电量平衡。
- (6)确定水电厂电量的利用程度，以论证水电装机容量的合理性。
- (7)分析系统与系统之间、地区与地区之间的电力电量交换，为论证扩大联网及拟定网络方案提供依据。

电力平衡代表年、月的选择

- 电力平衡需要逐年进行，应按逐年控制月份的最大负荷和水电厂设计枯水年的月平均处理编制。
- 一般以每年的12月为代表，但还应根据水电厂逐月发电处理的变化及系统负荷的变化情况，具体分析确定。
- 一年中也可能有2个月份其控制作用应分别平衡。必要时选择代表年进行逐月电力平衡，以便找出其中起控制作用的月份，然后按该代表月进行逐年平衡。

电力电量平衡表的编制

对象	年/月	说明
一、最大发电负荷		全系统计及同时率后的用电负荷加上线损和厂用电的总和
二、各类电厂工作容量		
三、各类电厂备用容量		
四、各类电厂需要装机容量		工作容量与备用容量的总和
五、各类电厂可能装机容量		系统中实际可能的装机安排容量
六、各类电厂新增容量		需要装机容量减去可能装机容量
七、各类电厂受阻容量		
八、各类电厂退役容量		每年退出运行的机组容量
九、各类电厂重复容量		
十、火电电力盈亏		火电需要容量与实际可能装机容量之差值

电力电量平衡表的意义

电力电量平衡表确定了逐年的发电容量后，
为进行电网的潮流分布及调压计算，制定网络方
案，选择送电线路导线截面和各种电气设备及无
功补偿设备选择等提供了科学依据。

2. 新能源对系统调峰的影响

- (1) 调峰的概念 *

- 电力系统中的用电负荷是经常发生变化，为了维持有功功率平衡，保持系统频率恒定，需要发电部门相应改变发电机的出力以适应用电负荷的变化，称为调峰。
- 由于用电负荷是不均匀的。在用电高峰时，电网往往出现超负荷，此时需要投入在正常运行以外的发电机组以满足需求，这些发电机组称调峰机组。

电力系统的调峰和调频有什么区别？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

12

电力系统调峰

- 电力系统调峰设计是为了满足电力系统日负荷峰谷差的需要，保证电力系统安全经济运行所进行的调峰容量安排和设备配置的一项设计。
- 调峰设计是电源发展规划的一个组成部分。其内容有：系统调峰需求量，调峰电源及容量，需求平衡及调峰方案选择。

- 如何配置调峰和备用来提高发电厂运行的经济性及电网运行的安全稳定性？具体措施包括：
 - 建设和改建水电机组；
 - 抽水蓄能电站与核电站配对建设；
 - 增加网内调峰机组的容量；
 - 开发能带中间负荷的蒸汽-燃气联合循环机组；
 - 扩大电网的容量或相邻电网之间的互连。

- (2) 传统调峰的类型

- 1) 燃煤火电机组为主

- ① 低负荷运行方式（尽可能在最低出力运行）；
 - ② 两班制运行方式（夜间低谷停机6~8h，清晨热态启动，机组重新并网）；
 - ③ 少汽无功运行方式（夜间低谷期机组出力减至零，但不脱网，吸收少量功率；耗能高，已较少采用）。

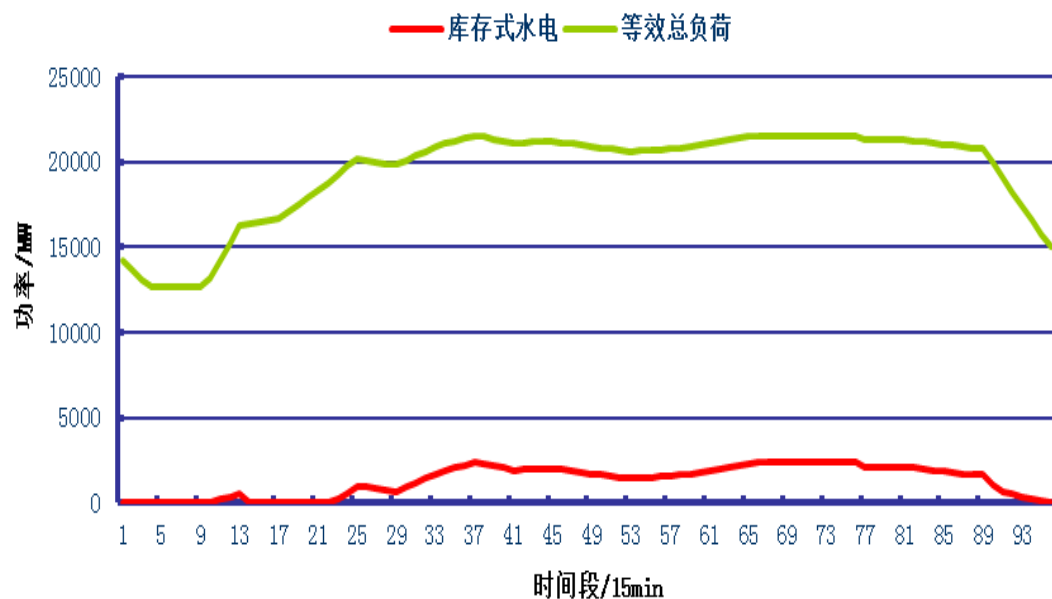
- 火电调峰存在的**问题**：

- 电网峰谷差逐年扩大；
 - 调峰机组用油量大；
 - 调峰机组的主、辅机寿命损耗大。

- (2) 传统调峰的类型

- 2) 库存式水电机组

- 利用水电的启停灵活、功率调节迅速的特点。水电从0出力到最大出力仅需几分钟的时间，因而可以很好的对系统负荷起到削峰填谷的作用并且跟踪新能源的出力波动。



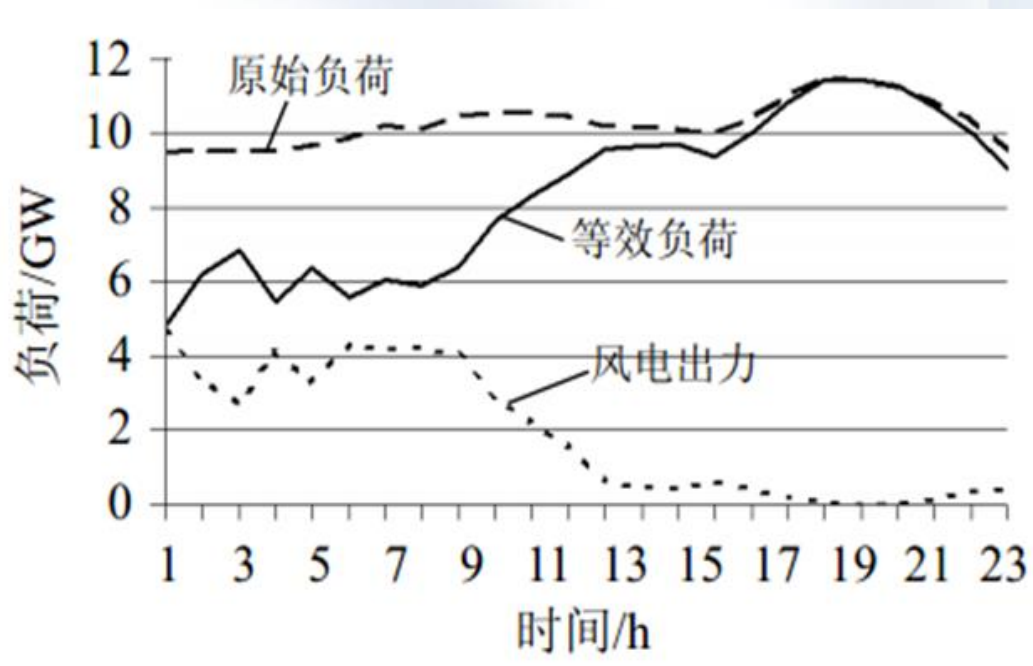
- (3) 风电对调峰的影响

- 风电调峰效应，日内风电出力曲线的增减趋势与系统负荷曲线的增减趋势基本相反，风电并网后使系统等效负荷曲线峰谷差增大的特性。

- 在电网低谷负荷全网出力过剩时不吸收系统功率，相反还输出功率，风力发电出力反而较高；
 - 在高峰时因机组电压低，又减低其可调出力，结果加重了其他调峰调频厂的压力；
 - 而且，在夜间低谷负荷时会出现严重高周波情况。
 - 因此，风电的**反调峰特性**增加了电网调峰的难度，增加了电网调频的压力和常规电源调整的频次。调峰容量不足会出现低负荷时段弃风的情况。

典型日风电出力与等效负荷曲线

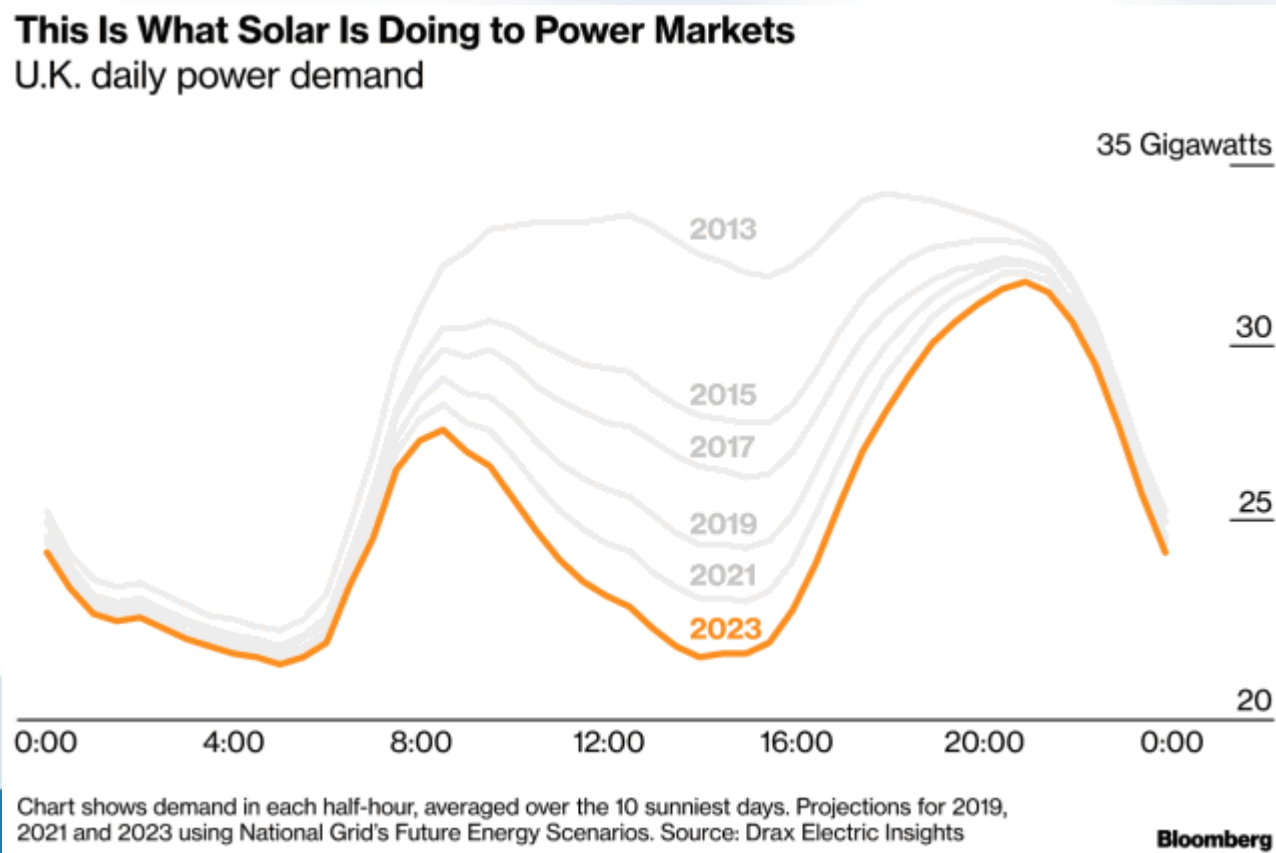
- 反调峰是指系统中风电机组的出力与系统负荷的变化趋势相反，因而将风电视为负的负荷与系统负荷相叠加后，会使得系统等效总负荷峰谷差明显增大。



风电反调峰示意图

- (4) 光伏对调峰的影响

- 光伏电池只在白天发电，白天具有一定的正调峰特性；但无法满足负荷晚高峰的运行，夜晚反调峰。



- (5) 新型调峰方式

- 燃料电池调峰

- 燃料电池能将燃料的化学能直接转化为电能，因此，它没有像通常的火力发电机那样通过锅炉、汽轮机、发电机的能量形态变化，不受卡诺循环限制，可以避免中间转换的损失，实际发电效率可达40~60%。

- 热水蓄热发电

- 采用负荷平均化的思想的一种热水蓄热发电设想，即以高压热水形式贮藏火电厂或核电站在夜间低负荷时的多余热能，在白天电力高峰时再将其转换成电力。

— 燃气热电联产调峰

- 燃气热电联产调峰既能起到电力调峰作用，又能利用发电时所产生的余热向市区供热，这种热电厂既是调峰电厂又是热电厂。它在发电方面起的作用是调峰，而上网电价可以低于调峰电价。

— 需求侧管理（Demand Side Management, DSM）

- * **DSM**的定义，是指对用电一方实施的管理，即通过政策措施引导用户高峰时少用电，低谷时多用电，提高供电效率、优化用电方式的办法。

— 需求侧管理（Demand Side Management, DSM）

- **DSM**的背景，从我国近年来的电力持续负荷统计来看，全国**95%以上的高峰负荷年累计持续时间只有几十个小时**，采用增加调峰发电装机的方法来满足这部分高峰负荷很不经济。如果采用需求侧管理的方法削减这部分高峰负荷，则可以缓解电力供需紧张的压力。
- 例如2000年美国投入约**15.6**亿美元实施需求侧管理工作，节电**537**亿千瓦时，减少高峰负荷**2200**万千瓦。美国联邦能源管理委员会2009年6月发布《需求响应潜力报告》显示,广泛实施需求响应措施,在今后**10**年中最高可削减全美高峰负荷的**20%**。

— 需求侧管理（Demand Side Management, DSM）

- **DSM的目的**，是电力供需双方共同对用电市场进行管理，以达到提高供电可靠性，减少能源消耗及供需双方费用支出。其**内容包括两方面**：
 - **1) 负荷控制和管理**
 - 根据用户的用电量、分时电价、天气预报以及建筑物的供暖特性等进行综合分析，确定最优运行和负荷控制计划；
 - 对集中负荷及部分工厂用电负荷进行监视、管理和控制，通过合理的电价结构引导用户转移负荷，平坦负荷曲线；
 - **2) 远方抄表和计费自动化**
 - 是指通过各种通信手段读取远方用户电表数据，并将其传至控制中心，自动生成电费报表和曲线等。

下面哪些负荷类型具备“需求响应潜力”？

- ☐ A 居民负荷
- ☐ B 商业负荷
- ☐ C 工业负荷
- ☐ D 电动汽车

— 需求侧管理（Demand Side Management, DSM）

- **DSM的措施**，采用拉大峰谷电价、实行负荷阶梯电价等电力市场化措施激励，引导用户调整生产运行方式和用电行为——基于智能电表的负荷特性分析等。同时还可采取一些政策激励，如推广节能灯、变频调速电动机及水泵、高效变压器等节能设备。
- DSM领域的重要概念——**可中断负荷**，是指在电网高峰时段或紧急状况下，用户负荷中心可以中断的部分。可中断负荷通常通过电力市场化的经济合同或协议实现，它由电力公司与用户签订，在系统峰值时和紧急状态下，用户按照合同规定中断、削减或转移负荷，电力公司给予用户一定的经济补偿。
- 典型的可中断负荷有：**电动汽车**等。

3. 机组组合 (Unit Commitment, UC)

- 随着国民经济的快速发展，每天对用电量的需求越来越大，而且存在明显的峰谷效应。为了实现电力供需的平衡，并最合理的利用发电资源，需要预先对发电机组的启停和出力进行调度安排。
- **UC包括：机组优化组合和优化启停**，就是在满足约束条件的情况下，优化地选定各时段参加运行的机组，求出机组的最佳运行方案，实现发电成本最小。

电力系统UC建模

- 对于发电侧，主要考虑系统中常规火电机组自身所具备的调节容量和库存式水电的容量以及供热机组的调峰容量，分别考虑这三者对系统调峰能力的影响。
- 输电侧的充裕性资源主要表现为大规模外送通道的容量，共享送电端和受电端的充裕性资源，两者互为备用，辅助对方调峰，在更大范围内消纳系统接入的风电等新能源。
- 用电侧的充裕性资源则表现为新能源风电、光伏的多样化利用方式和各种需求侧灵活负荷的容量，考虑需求侧灵活负荷在系统中的接入量以及对系统调峰能力的改善。

- 以系统总运行成本最低来建立目标函数
 - 在考虑系统总运行成本时，将风电机组的运行成本设置为零，进而可以在最大程度上减少弃风量，保证风电出力优先调度。
 - 同时需要考虑火电机组的启停费用，并且当外送通道的实际外送功率和设定的外送功率值出现偏差时，需要计及一定的惩罚费用增加到系统的总运行成本中。
 - 库存式水电机组的单位功率运行费用及某时段的实际出力。
 - 径流式水电机组的单位功率运行费用及某时段的实际出力。
 - 各功率类型常规火电机组中机组的单位功率燃料费用和运行费用，及某时段的实际出力。
 - 供热机组的单位功率燃料费用和运行费用，及某时段的实际出力。

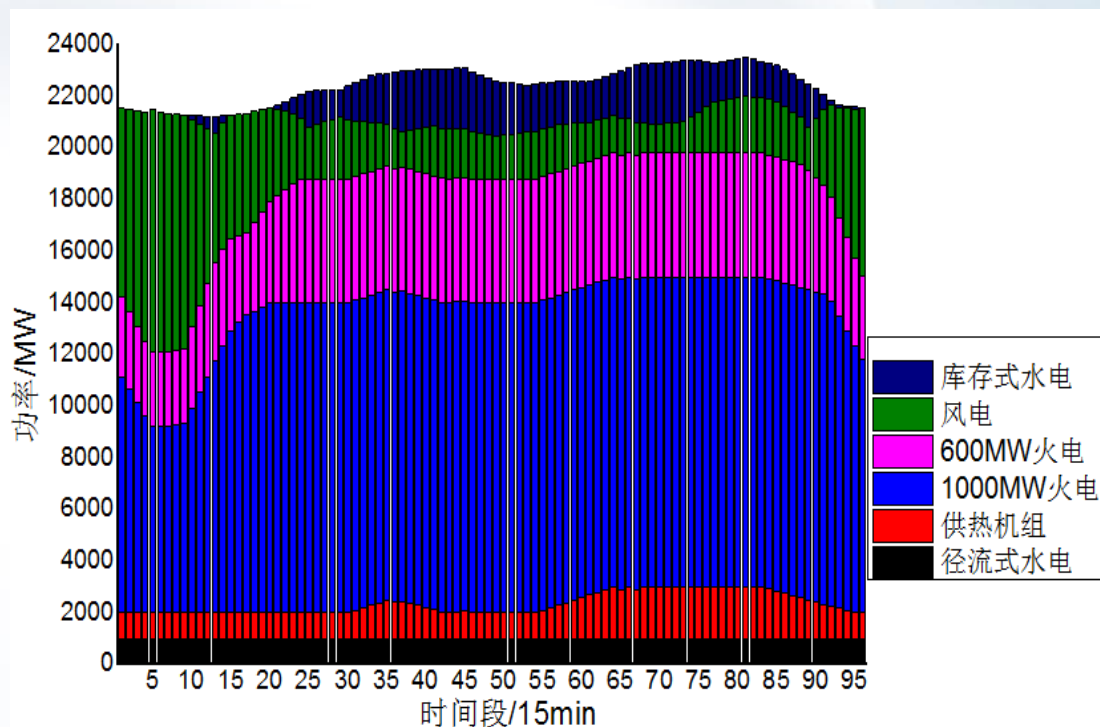
• 约束条件:

- 系统功率平衡约束及备用容量约束
- 风电、光伏出力预测误差
- 库存式水电机组受备用限制的最大技术出力约束和自身最小强迫出力约束
- 库存式水电机组每日发电总量约束
- 径流式水电机组固定出力约束
- 常规火电机组的最大最小技术出力限制
- 常规火电机组的最小启停时间约束
- 常规火电机组的上下爬坡速率约束
- 供热机组的最大最小技术出力限制
- 供热机组的最小启停时间约束
- 供热机组的上下爬坡速率约束
- 系统外送通道的容量约束和最小外送功率约束

- 机组组合问题是一个多变量、多约束的混合整数非线性规划问题。
- 求解方法
 - 混合整数规划
 - 求解各功率类型机组和外送通道以及灵活负荷在各个时段内的开机状态，启停费用，开机功率大小。

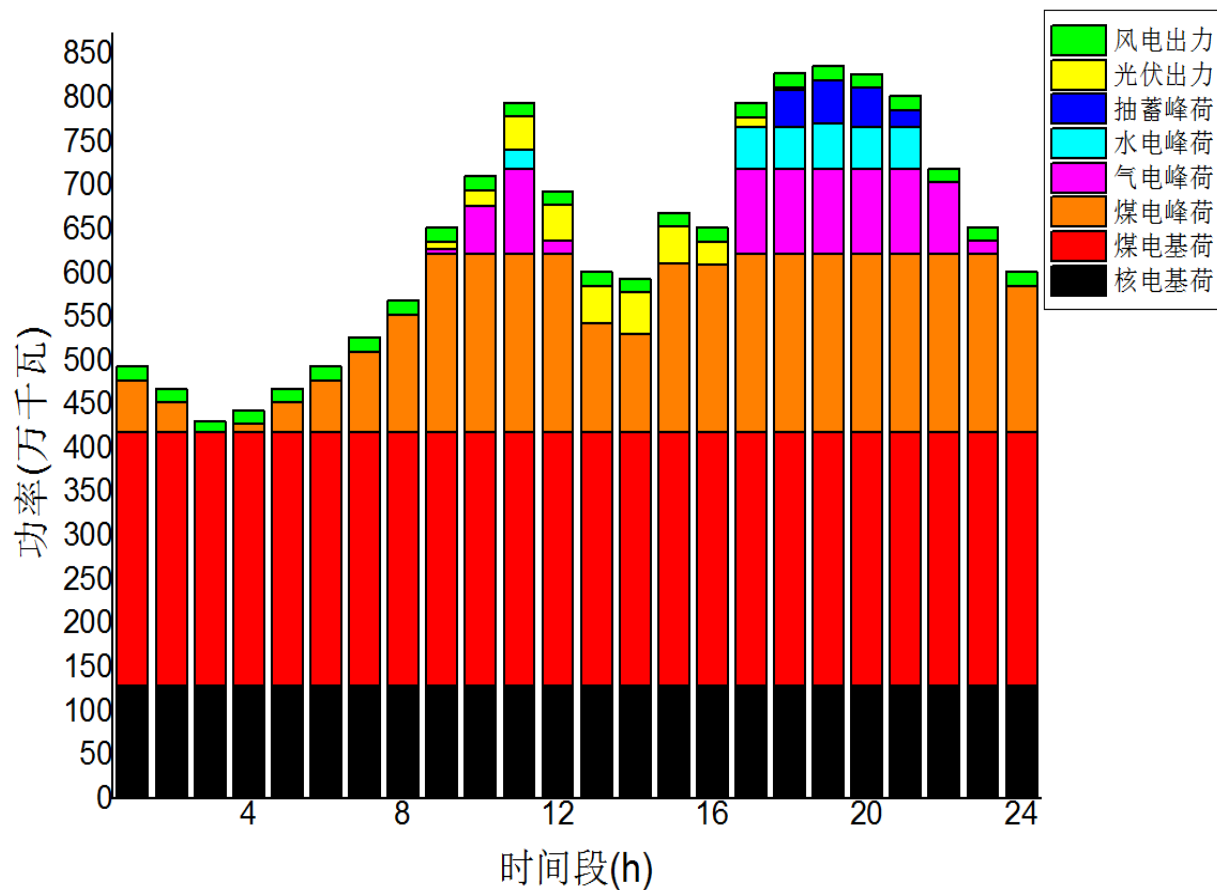
UC调峰结果实例

- 库存式水电机组承担系统的**峰荷**，减小系统的峰谷差。
- 供热机组在风电出力较大的时段内压低机组出力，缓解风电大发时段系统的调峰压力，增加系统的调峰裕度。



某省2015年夏季典型日各机组预计出力安排

最大负荷典型日系统运行情况

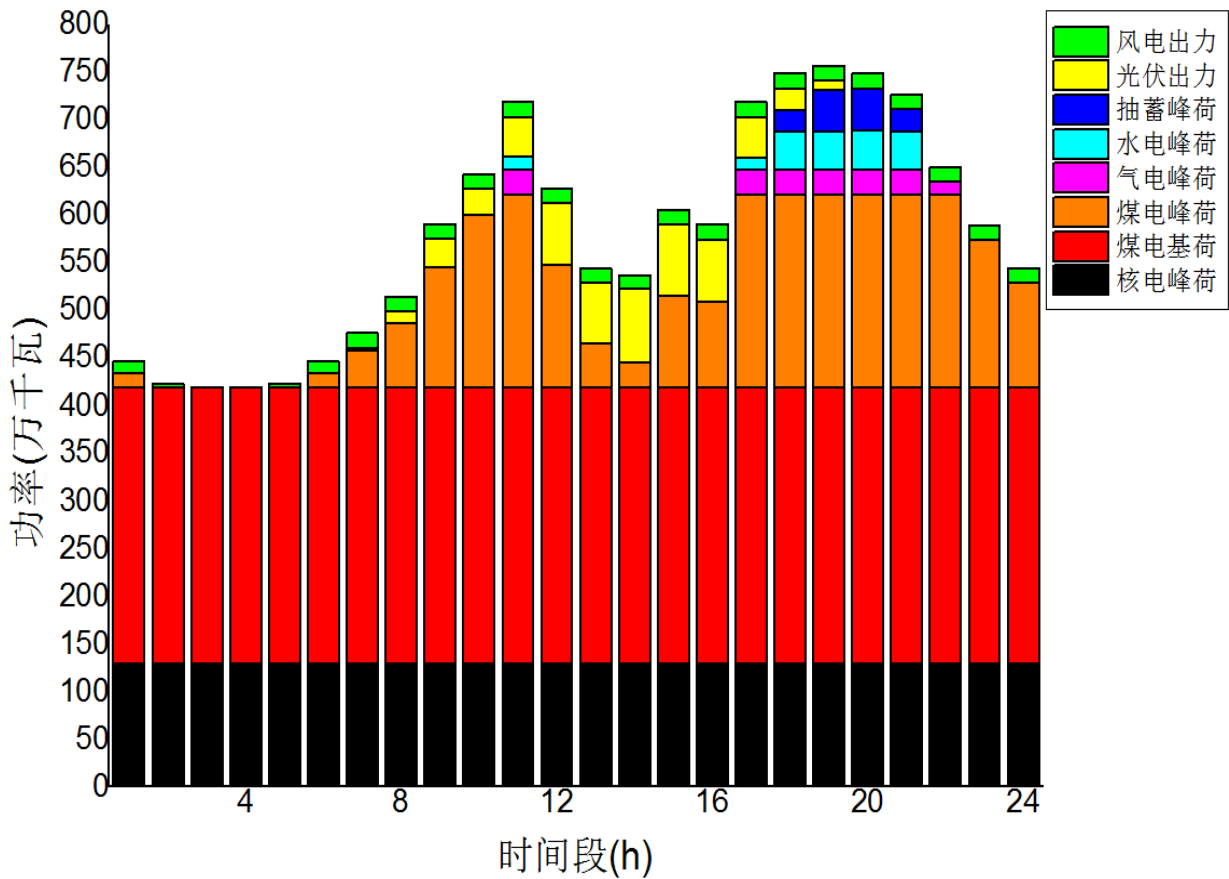


负荷峰值	火电工作容量	水电工作容量
837	720	117
旋转备用容量	冷备用容量	检修备用容量
83.7	42.37	113

单位：万千瓦

系统负荷较大，此时系统中的火电按经济性指标排序，投入抽水蓄能机组，未采取弃风手段即满足系统中的调峰要求。

新能源反调峰典型日系统运行情况



负荷峰值	火电工作容量	水电工作容量
749.4	648	101.4
旋转备用容量	冷备用容量	检修备用容量
74.94	138.75	113

单位：万千瓦

系统负荷较小，此时系统中的火电按经济性指标排序，投入了抽水蓄能机组，并**采取弃风手段**方解决系统中的调峰问题。

4. 备用容量的选取

- 电网预留一定的发电容量备用，是电网安全、稳定运行的基础，它能保证系统在受到一定范围的扰动时，平稳的过渡到新的稳定运行状态。
- 备用容量的预留，除了要考虑电网运行的可靠性外，还要考虑：
 - 经济性
 - 区域分配
 - 响应速度等因素

◆备用定义 *

◆电力系统运行中的备用容量，是指能使电网能经受设备随机停运、负荷波动等扰动，能尽快地建立发电与负荷的平衡，保证频率在规定的范围，不发生连锁事故甚至大面积停电。

◆按备用的作用分为哪几类？

◆负荷备用——平衡瞬间负荷波动与负荷预计误差2~5%

◆事故备用——平衡电力系统中发电和输电设备发生故障时，保证正常供电所需设置的发电容量5~10%

◆检修备用——保证电力系统的设备能按计划进行检修4~5%

◆国民经济备用——满足工农业超计划增长3~5%

◆按备用设备所处状态分类:

◆热备用(旋转备用, Spinning Reserve)

在系统频率下降时能自动投入工作的备用容量。设备处于运转状态, 或是空载运行, 或是带部分负荷运行。

- 水电站的旋转备用状态可以是空载运行;
- 火电站则是带最小技术出力或部分负荷运行;
- 系统一旦出现超预测值的负荷时, 这种处于运转状态下的备用容量可以很快投入使用, 即它的主要功能是能适应电力系统负荷瞬间的快速波动及一天内计划外的负荷增长。

◆冷备用

处于完好状态的停止运行设备, 一旦满要时立即可以启动投入运行。包括火电厂处于压火、暖机状态下的设备及水电厂停运但仍担负备用任务的设备。

它主要为设备的计划检修、事故停运及系统日负荷出现额外增长时提供必要的补充容量。

■ 确定备用容量的方法

➤ 确定性方法

- 确定性准则也称为“备用裕度准则”，以运行经验为基础，判定运行备用可靠性，在传统电力工业时代基本上是用这种方法来确定备用容量的，它是按照系统内最大机组容量或系统高峰负荷的一定比例来确定备用容量，其大小是一般是规程规定的。

■ 确定备用容量的方法

➤ 确定性方法

- ①**装机备用法**——数值上等于预计的最大负荷功率加上一个固定百分数。此方法通常在电网规划时使用。
- ②**运行备用容量**——数值上等于负荷需求加上一固定百分数或一台最大机组容量作备用容量。目前多数国内电网，如华东电网所采用的方法。
- ③**输电网络的N-1规则**——电网在所选定的1回输电元件故障跳闸后，应能保持负荷的连续供电。在可靠性要求较高的场合，可采用N-2规则甚至N-K规则。该规则可以同时用于规划电网结构和确定电网的运行备用容量。

- 概率性方法

概率的方法是基于以下两点客观事实：

(1) 实际参与上网运行的机组都存在着一定的事故停机概率；

(2) 由于负荷预测的精度问题，以及负荷自身存在着波动，使预测值不等于实际值，同样可以看作某一容量的负荷出现的概率问题。

➤ 因此，概率分析法是指定量分析电力系统的可靠性指标，并依据可靠性准则来判定系统预留的备用容量是否合理。

■ 加入新能源后系统备用容量的确定

需考虑：

◆ 负荷预测偏差

◆ 发电机停运率

◆ 新能源出力的不确定性所导致对新能源发电功率预测结果偏差等因素的影响

新能源的不确定性导致了系统所需的备用容量增加，新能源发电容量越大，所需备用容量越多，同时系统允许的失负荷数对备用容量也有一定的影响。因此，对加入新能源后的系统备用容量的优化分配问题还需进一步的研究。

风电王国 —— 丹麦的风电备用特点

- 丹麦风能协会提出的到2020年的风能发展规划，风力发电占总发电量的比例将由目前的约28%提高到50%，其备用的特点：
 - 负荷的经济调度（电力市场）
 - 电力的国际进出口（北欧四国水电丰富，God-Blessed Countries）
 - 调整其它电源的出力

电力市场辅助服务

- 电力市场辅助服务概念 *

- 电力市场辅助服务是指为维持电力系统的安全稳定运行或恢复系统安全，以及保证电能供应，满足电压、频率质量等要求所需要的一系列服务。

- 辅助服务分类

- 1、与频率控制相关的服务：包括调速控制、自动发电控制、有功备用服务（含调峰、调频备用）。
 - 2、与电压稳定相关的服务：主要指无功支持和电压控制服务。
 - 3、与暂态稳定相关的服务：包括甩负荷及自动解列，PSS稳定控制等服务。
 - 4、其他类型的辅助服务：黑启动服务和电能质量服务。

电力市场辅助服务

- 市场模式
 - 辅助服务的市场模式包括统一型、投标型和双边合同型三种，或者是其中两种的结合。
- 辅助服务定价
 - 常用的定价方法：综合成本法、长期边际成本法和短期边际成本法等。

5. 系统对新能源风电、光伏的消纳能力

- 新能源发电的消纳能力取决于三方面：
 - 一是新能源电源的**出力特性**，发电出力特征越是与系统用电特性相似，电力系统的消纳能力就越强；
 - 二是负荷的**用电特性**，若通过实时电价等经济手段使负荷的用电特性相似于新能源发电出力特性，电力系统的消纳能力也就越强；
 - 三是消纳新能源的电力**系统规模**，规模越大，消纳新能源发电的能力也就越强。

■ 风电消纳能力的计算方法

影响风电消纳的因素：

- ◆ **系统调节能力**：良好的电源结构和充足的备用容量是风电消纳的基础；
- ◆ **电网输电能力**：可以扩大风电平衡区域范围，充分利用系统备用容量；
- ◆ **风电并网技术性能**：德国最新的并网标准提出了零电压穿越的要求，要求风电场/光伏电站在电网电压跌落到0的时候仍能并网运行**150ms**）；
- ◆ **风电调度运行水平**：好的风电的调度管理，合理安排系统中其他电源的运行模式，是实现风电电量最大化消纳的关键。

◆目前，国内电力系统风电消纳的主要受限
原因因为调峰约束和电网输送能力约束限制。

◆风电消纳能力的具体计算流程：

- ◆Step 1，拟定初始方案，明确边界条件。主要包括：各水平年的电力需求及负荷特性，常规水电、供热机组、核电、太阳能发电的开发规模及布局，跨区输电规模，各类电源和电网的技术经济参数等。
- ◆Step 2，优化电源结构。将各地区的风电初步开发方案作为风电开发上限，根据风电出力特性，以全社会电力供应总成本最低为目标，优化确定各地区各水平年常规煤电、抽水蓄能、燃气轮机等电源的开发规模及布局。

◆ 风电消纳能力的具体计算流程：

- ◆ Step 3，**系统调峰平衡分析**。进行电力系统逐月典型日 24 小时的详细生产模拟分析，确定开机组合，通过系统调峰平衡和风电出力特性分析，初步确定各水平年各地区的风电消纳规模。
- ◆ Step 4，**系统调频平衡分析**。根据开机组合，进行系统连续稳态运行分析，检查其他机组出力能否及时跟踪风电及负荷变化，校核修正系统风电消纳能力。

◆风电消纳能力的具体计算流程：

- Step 5，判断收敛情况。把上 2 步初步确定和校核修正的风电开发规模作为固定边界条件，重新进行电源结构优化和系统风电消纳能力分析，检验前后 2 次计算的各水平年风电开发规模差值（包括规划期总量差值和各年最大差值），循环计算直至差值小于某一设定值。
- Step 6，输出分析结果。输出各水平年常规煤电、抽水蓄能、燃气电站的开发规模及布局，各地区风电的开发规模及消纳市场，以及系统各类技术经济指标等。

■ 光伏消纳能力的计算方法

光伏发电消纳分析原则：

- 按照安全、清洁、经济的原则即新能源优先的原则，从电力系统的整体效益出发，根据电力系统中各类电源，包括水电、火电、风电等运行的技术经济特点，优化水电、火电等常规电源运行方式，促进风电、光伏发电的高效率利用。
- 考虑系统中各电站的计划检修、负荷备用、事故备用等约束条件，模拟系统全年365天各电站的运行方式和发电曲线，从调峰层面分析风力、光伏发电等新能源的消纳方案。
- 然后进行负荷跟踪能力即调频层面的校核，若校核不通过，则返回调整检修计划和开机组合。若负荷跟踪能力校核通过，则进行网络约束分析，进而得到考虑网络约束的太阳能发电等新能源消纳方案。

