



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# Lecture 13

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

熟悉新能源容量可信度指标及随机生产模拟方法。

## 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。

## 5.2 新能源发电的容量可信度

- 含新能源的电力系统规划问题
  - 首先必须提高新能源风力、光伏发电的预测精度；
  - 另一方面，需考虑新能源电源的电力系统随机生产模拟。本节分别介绍传统电力系统可靠性及随机生产模拟方面的基础知识。

# 一、发电系统的可靠性基本概念

- 发电系统可靠性

- 是指评估统一并网运行的全部发电机组按可接受的标准及期望数量，来满足电力系统负荷电力和电量需求能力的度量。

- 研究发电系统可靠性的主要目标

- 确定电力系统为保证充足的电力供应所需的发电容量。
  - 发电容量分为**静态容量**和**运行容量**两个不同的方面。
    - **静态容量**是指对系统所需容量的长期估计，可考虑为装机容量。
    - **运行容量**是指对于为满足一定负荷水平所需实际容量的短期估计。

# 一、发电系统的可靠性基本概念

- 发电系统的可靠性与其备用有关：备用容量愈大，系统愈可靠。
- 发电系统可靠性计算中，将采用**裕度的概念代替备用容量**。
- 发电裕度是一个不确定的随机量，其定义为：可用容量-负荷：

$$M = \sum_i W_i - P_s$$

- 系统裕度应在以下范围内变化：

$$-P_{\max} \leq M \leq \sum_i C_i - P_{\min}$$

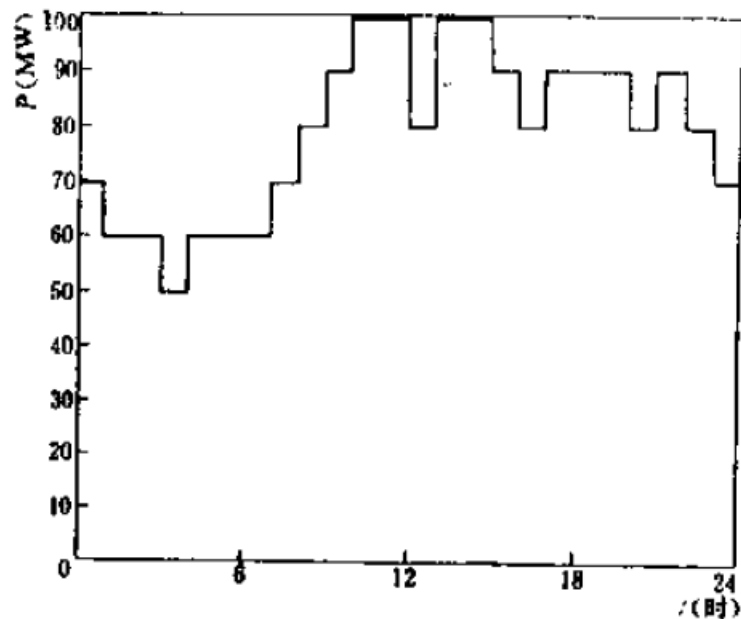
# 发电裕度表

- 分析发电系统可靠性的关键是**根据负荷曲线求出裕度表**，即计算出各种裕度出现的概率和频率，然后利用裕度表求出**系统的可靠性指标(充裕性)**。
- 裕度表中离散点的个数 $N_I$ 为：

$$N_I = N_S + N_C + 1$$

$$N_S = C_S / \Delta X = \sum_i C_i / \Delta X$$

$$N_C = P_{\max} / \Delta X$$



- **日负荷曲线**，最大负荷为100MW。设该系统发电机组的总可用容量 120MW，则该系统的最大裕度发生在所有发电机组正常运行，且系统为最小负荷50MW的情况下，即最大裕度为70MW。最小裕度则将出现于所有发电机组都处于故障停运状态，即系统的总运行容量为0，而系统又出现最大负荷100MW时，这时的裕度为-100MW，也就是系统缺电100MW。

表 3-1

裕 度 表 举 例

序号 $I$	裕度 $x_i$ (MW)	累积概率 $P_i^*$	累积频率 $F_i^*$ (次/天)	确切概率 $P_i$
0	120	1.000000	0.000000	0.000000
1	110	1.000000	0.000000	0.000000
2	100	1.000000	0.000000	0.000000
3	90	1.000000	0.000000	0.000000
4	80	1.000000	0.000000	0.000000
5	70	1.000000	0.000000	0.034592
6	60	0.965408	0.830383	0.172860
7	50	0.792448	0.831258	0.103776
8	40	0.688672	0.831784	0.174401
9	30	0.514271	3.357843	0.218967
10	20	0.297304	1.751258	0.156740
11	10	0.140564	0.163314	0.028871
12	0	0.111693	0.266424	0.028804
13	-10	0.082889	0.367760	0.034639
14	-20	0.048251	0.401361	0.027975
15	-30	0.020276	0.154918	0.013828
16	-40	0.006448	0.016783	0.001755
17	-50	0.004693	0.021302	0.002088
18	-60	0.002605	0.024779	0.001693
19	-70	0.000912	0.009459	0.000792
20	-80	0.000120	0.000201	0.000040
21	-90	0.000080	0.000774	0.000048
22	-100	0.000032	0.000387	0.000012



## 二、 新能源发电的容量可信度指标

- 新能源具有较强的随机性、间歇性和波动性等明显区别于常规能源的特点，而且当新能源在电网中所占比例较大时，对电力系统的可靠性运行有很大影响。
- 新能源发电的可靠性及其对电力系统的影响，需充分评估新能源的**容量可信度，也称置信容量**（Capacity Credit, CC）。

# 容量可信度的概念

- 以风电为例：
  - 狭义上讲：风电容量可信度是指在等可靠性前提下风电机组可以替代的常规机组的容量占风电场总容量的比例。
  - 广义上：
    - 等效可靠容量的比例
    - 等效常规机组容量的比例
    - 等效带负荷能力
    - 或一定置信度下的保证出力

## 容量可信度的影响因素

- (1) 平均风速
- (2) 风电出力与系统负荷的相关性
- (3) 多风电场出力之间的相关性
- (4) 风电场的尾流效应
- (5) 风电接入比例
- (6) 风电场在系统的位置
- (7) 储能设备
- (8) 互动负荷

- 新能源机组的容量可信度计算

现有的新能源发电容量可信度的评估指标有许多种，总体上可分为以下三类：

- 1) 从电源侧考虑

- 电力系统增加新的电源一般会提高系统的可靠性水平。在等可靠性前提下，新能源机组可以替代的参考机组容量的大小可以用来评估新能源发电系统的容量可信度。

$$R = f(C_r + C_w, L) = f(C_r + C_v, L)$$

$$C_{PV} = C_v$$

$$\lambda = \frac{C_v}{C_w}$$

- 新能源机组的容量可信度计算

- 2) 从负荷侧考虑

- 用有效载荷能力（ELCC）来表示置信容量。有效载荷能力是指在保持可靠性指标不变的条件下，引入新能源发电后可以增加的负荷量。

$$R = f(C_r, L) = f(C_r + C_w, L + \Delta L)$$

$$C_{PV} = \Delta L$$

$$\lambda = \frac{\Delta L}{C_w}$$

- 新能源机组的容量可信度计算
  - **3) 基于特定时段的容量系数（CF）作为容量可信度的近似评估指标**
    - 按一定比例选取负荷较高或失负荷概率较高的时段，对连续数年的电力系统运行方式进行分析。**CF**值即为该段时间内新能源机组的近似容量可信度。

$$CF = \frac{E}{C_w \times t}$$

- 三类方法的优缺点：
  - 等效容量的评估指标将新能源发电系统等效为人们所熟悉的常规电源，但是计算量较大，置信容量的大小会随着等效机组的选取而产生差异。
  - 有效载荷能力的评估指标能够直接描述电源发电的效用，一般比较推荐。
  - 容量系数的评估指标仅凭经验来判断，理论性不够强，且无法体现新能源出力与负荷的相关性。

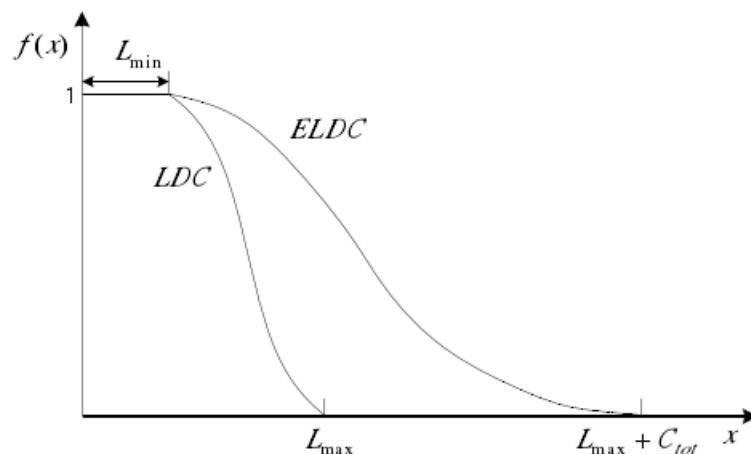
- 常用的容量可信度指标详细计算
  - (1) 从电源侧进行考虑，在保证系统可靠性指标不变的前提下，以新能源并入电网后所能替代的常规机组的容量作为新能源发电的置信容量；
    - 等效固定容量
    - 等效常规容量
  - (2) 从负荷侧出发，在保证系统可靠性不变的前提下以系统有无新能源发电的情况下可承载的系统尖峰负荷的差值来衡量新能源发电的可信用容量，也就是新能源的等效载荷能力。
    - 等效载荷能力



# 负荷持续曲线 —> 随机生产模拟

- **负荷持续曲线**(Load Duration Curve, LDC)来自时序负荷曲线，是将电力系统一年中各时间点出现的负荷按照大小排列后得到的曲线。
- 负荷持续曲线横坐标表示系统负荷，纵坐标表示负荷持续的时间，表达式为 $t=F(x)$ 。曲线上面任何一点  $(x, t)$  表示系统负荷大于或等于 $x$ 的持续时间。

$$p = f(x) = F(x)/T$$



负荷持续曲线和等效负荷持续曲线

发电系统的可靠性，仅针对发电和负荷，不考虑系统的连通性。

- **等效负荷持续曲线**(Equivalent Load Duration Curve, ELDC)是把发电机组的故障当成负荷，对持续负荷曲线不断修正的结果。
  - 它是把实际机组用完全可靠的虚拟机组及虚拟的随机负荷代替；
  - 虚拟负荷发生的概率密度函数等于发电机组停运容量的概率密度函数；
  - 而计及机组虚拟负荷的系统负荷称为系统的等效负荷。

# 发电生产模拟

- 发电生产模拟

- 在给定的负荷条件下，模拟各发电机组的运行状况，计算发电系统生产费用的一种仿真方法。
- ①处理负荷数据。②根据合理的原则安排机组检修计划。③确定机组带负荷顺序。④按照机组带负荷顺序，逐台计算各机组的发电量。⑤计算发电系统的燃料费用运行费用及可靠性(如电力不足概率、等指标)。

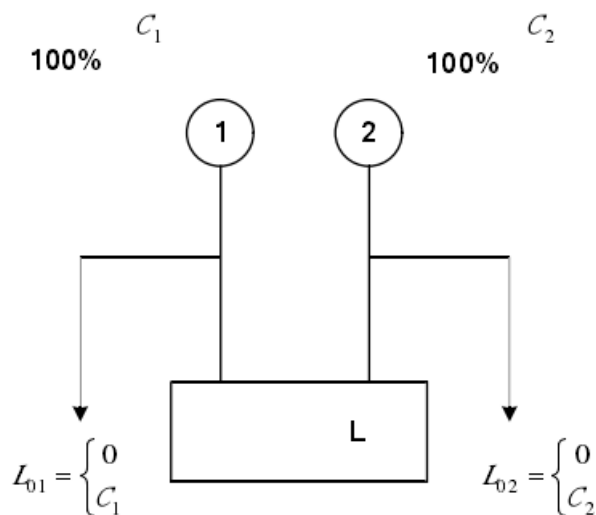
- 随机生产模拟

- 考虑发电机组受迫停运对系统运行的随机影响而进行的生产模拟。
- 它可以更准确地计算出发电生产费用和发电系统的可靠性。

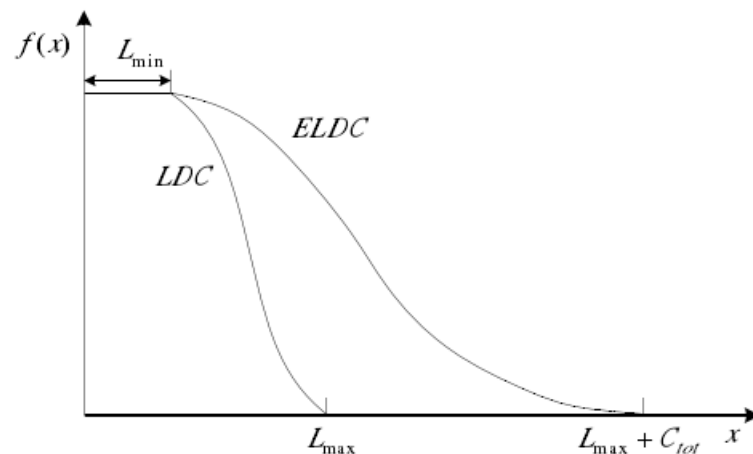
- 假设系统的原始负荷持续曲线用 $f_0(x)$ 表示，发电机组1的额定容量为 $C_1$ ，强迫停运率为 $q_1$ ，正常运行的概率为 $p_1$ ，其中 $q_1=1-p_1$ ，根据Baleriaux-Booth卷积公式，考虑发电机组1#随机停运影响后，系统的等效负荷持续曲线为：

$$f_1(x) = p_1 f_0(x) + q_1 f_0(x - C_1)$$

$$f_i(x) = p_i f_{i-1}(x) + q_i f_{i-1}(x - C_i)$$



虚拟发电机组及虚拟的系统负荷模型



负荷持续曲线和等效负荷持续曲线

$$f_i(x) = p_i f_{i-1}(x) + q_i f_{i-1}(x - C_i)$$

在发电机逐个卷积的过程中，等效负荷持续曲线在不断变化，最大等效负荷也在不断增加。

- 假设系统有  $n$  台发电机，当全部发电机组卷积运算结束后，等效负荷持续曲线为  $f_n(x)$ 。设  $G_n$  为系统的总装机容量， $C_{out}$  为系统停运容量， $E = L + C_{out}$  为等效负荷。根据等效负荷持续曲线的物理意义可知含有  $n$  台机组的系统的失负荷概率为：

$$LOLP_n = P(L > G_n - C_{out}) = P(E > G_n)$$

- 新能源机组的容量可信度

- (1) 等效固定容量（等效理想机组容量）

- 机组的等效固定容量是指若一个既存系统并入机组  $g$  时系统可靠性指标的降低值跟并入一台容量为  $C_{EFC}$  的理想机组（可靠度为100%）的降低值相等，则称机组  $g$  的等效固定容量 (Equivalent Firm Capacity) 为  $C_{EFC}$ ，步骤如下：

- 1) 一个有  $n$  台发电机组、总装机容量为  $G_n = \sum_{i=1}^n C_i$  的既存系统，其失负荷概率为：

$$LOLP_n = f_n(G_n)$$

◆2) 对于额定容量为 $C_{EFC}$ 的理想机组，由于其停运容量等于 $C_{EFC}$ 的概率为 0，停运容量等于 0 的概率为 1，根据前述公式，理想机组加入系统后，等效负荷持续曲线可表示为：

$$f_{n+1}(x) = 1 \times f_n(x) + 0 \times f_n(x - C_{EFC}) = f_n(x)$$

◆3) 加入理想机组后等效负荷持续曲线的形状没有发生变化，此时系统的失负荷概率为：

$$LOLP_{n+1} = f_n(G + C_{EFC})$$

◆4) 令并入第 $n+1$ 台新的常规机组后系统的失负荷概率等于接入理想机组后的失负荷概率，即：

$$f_{n+1}(G_n + C_{n+1}) = f_n(G_n + C_{EFC})$$

– 5) 得到该机组的等效固定容量为:

$$C_{EFC} = f_n^{-1}(LOLP_{n+1}) - G_n$$

– 6) 根据容量可信度的定义, 该机组的容量可信度是该机组的等效固定容量与额定容量的比值, 因此常规机组  $n+1$  的容量可信度为:

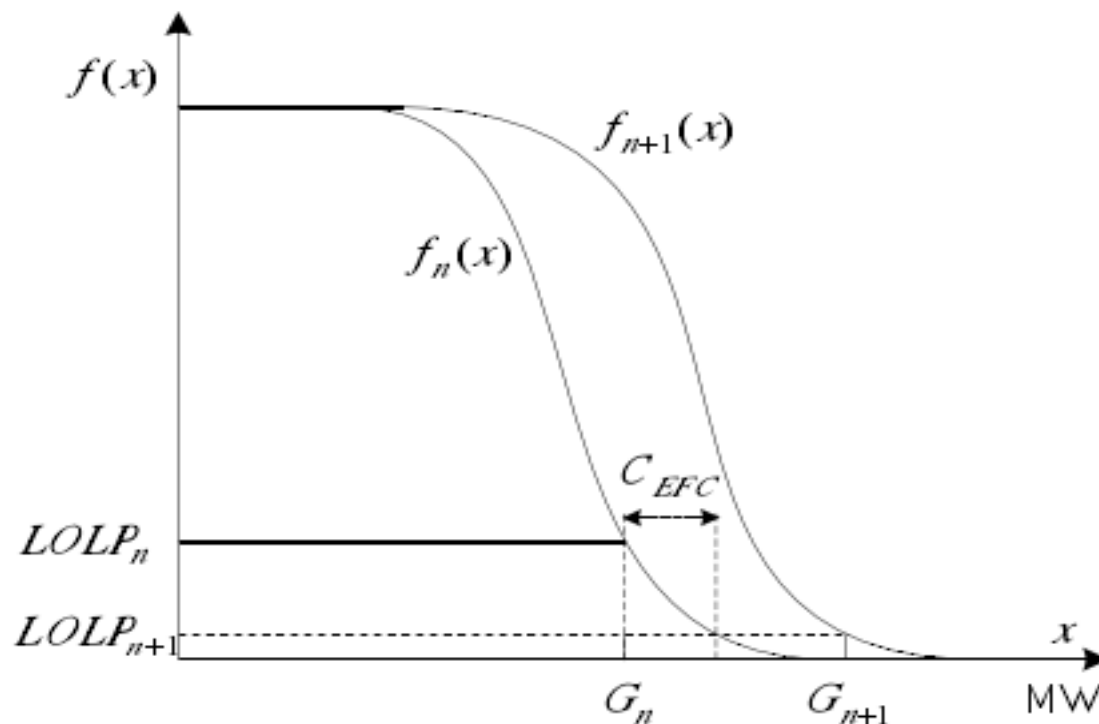
$$CC_{EFC} = [f_n^{-1}(LOLP_{n+1}) - G_n] / C_{n+1}$$

– 7) 如若并入的不是常规机组, 而是一个总装机容量为  $G_w$  的新能源电源, 则可得到该新能源的容量可信度为:

$$CC_{EFC} = [f_n^{-1}(LOLP_{n+1}) - G_n] / G_w$$



下图中的失负荷概率 $LOLP_n$  [填空1] (大于或小于)  
 $LOLP_{n+1}$  , 可靠性 $f_n(x)$  [填空2] (大于或小于) $f_{n+1}(x)$  ?



新能源机组等效固定容量EFC示意图

作答

## (2) 等效常规机组容量

- 等效常规容量也是从发电侧出发来分析新能源的发电置信容量，与等效固定容量的不同点在于，在等效过程中不是等效为一台理想机组，而是等效成一台具有一定强迫停运率（不为零）的常规机组。
- 先假定参照常规机组的可用率为 $p_{ECC}$ ，问题在于这台参照机组的容量 $C_{ECC}$ 要为多大才能使其加入系统后系统的可靠性指标跟机组  $n+1$  并入后的可靠性指标相同。

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{n+1}(x) = p_{ECC} f_n(x) + (1 - p_{ECC}) f_n(x - C_{ECC}) \\ LOLP_{n+1} = f_{n+1}(G_n + C_{ECC}) = p_{ECC} f_n(G_n + C_{ECC}) + (1 - p_{ECC}) f_n(G_n) \\ f_n(G_n + C_{ECC}) = \frac{LOLP_{n+1} - (1 - p_{ECC}) f_n(G_n)}{p_{ECC}} \\ C_{ECC} = f_n^{-1}\left(\frac{LOLP_{n+1} - (1 - p_{ECC}) f_n(G_n)}{p_{ECC}}\right) - G_n \end{array} \right.$$

### (3) 等效载荷能力 (Effective Load Carrying Capability, ELCC)

- ELCC最早源于1966年美国的L.L. Garver发表的文献，其核心含义是一台机组加入到系统后，在不减小系统备用容量的条件下，所能承担的系统最大尖峰负荷的增加值就是该机组的有效载荷能力。
- 用机组的等效载荷能力来定义机组的容量可信度。一台机组并入系统后，在不减小系统可靠性指标的条件下，系统能够增加的最大恒定负荷值就是该机组的等效载荷能力。这里的恒定负荷是指系统在所有时刻都承担的负荷增值。

- 假定系统原有  $n$  台机组，等效负荷持续曲线为  $f_n(x)$ ，系统失负荷概率为  $LOLP_n$ ，现加入额定容量为  $C_{n+1}$  的机组  $n+1$  后系统的等效负荷持续曲线变为  $f_{n+1}(x)$ ，同时加入一个恒定负荷  $L$  后，根据等效载荷能力的定义，此时系统的可靠性水平保持在  $LOLP_n$  水平。在加入一个恒定负荷之后，系统  $f_{n+1}(x)$  的形状不会发生变化，但是会向右移动一个  $L$  位置，那么这个  $L$  就是机组  $n+1$  的等效载荷能力大小。于是有如下关系式：

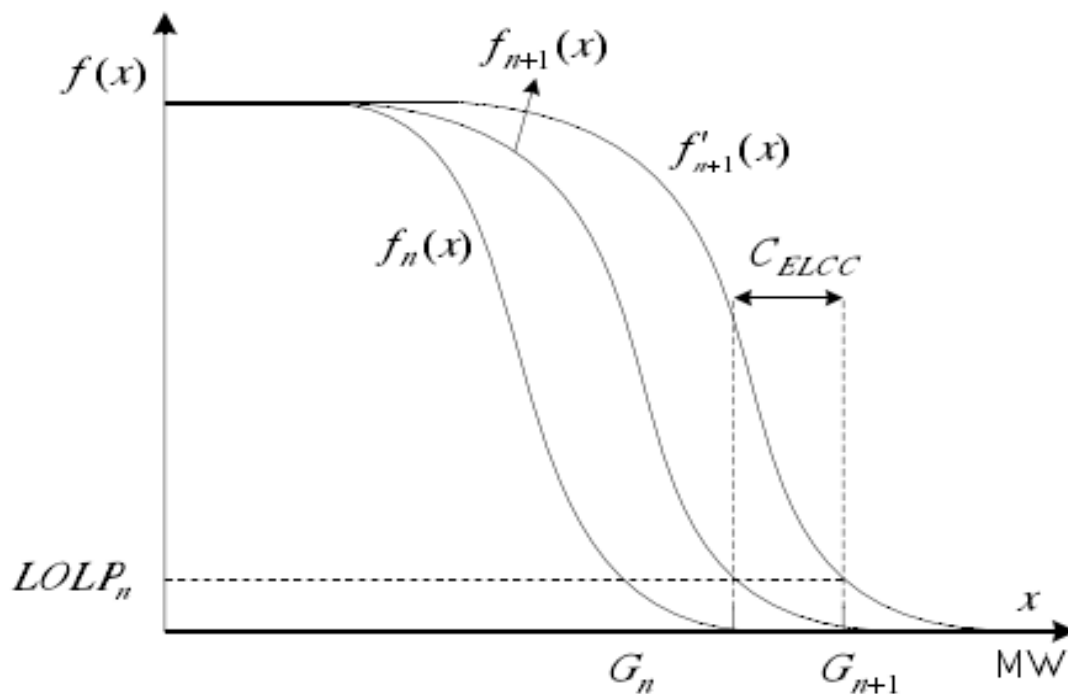
$$f_n(G_n) = f_{n+1}(G_{n+1} - C_{ELCC}) = f'_{n+1}(G_{n+1}) = LOLP_n$$

$$G_{n+1} - C_{ELCC} = f_{n+1}^{-1}(LOLP_n)$$

$$C_{ELCC} = G_{n+1} - f_{n+1}^{-1}(LOLP_n) = G_n + C_{n+1} - f_{n+1}^{-1}(LOLP_n)$$

$$CC_{ELCC} = \frac{G_n + C_{n+1} - f_{n+1}^{-1}(LOLP_n)}{C_{n+1}}$$

- $C_{ELCC}$ 的下标表示是以等效载荷能力为替代量定义的容量可信度。



等效载荷能力示意图

## 基于负荷持续曲线类方法的特点：

- 这3种指标的求解过程都需要用到函数的求逆。虽然，这几个函数都是单调可逆的，但是一般都很难找到精确的数学表达式。
- 在已经得到既存系统配置情况的前提下，求解第  $n+1$  台机组并入系统后的可靠性指标  $LOLP_{n+1}$  的过程相对容易，但反过来，已知  $LOLP_{n+1}$  反求机组  $n+1$  的等效固定容量或等效载荷能力的过程则非常复杂。一般都需要通过迭代方法计算——线性插值法、二分法、弦截法等。



## 5.3 新能源穿透功率极限分析

- 意义

- 在大容量储能的存在性仍未解决之前，电能仍被视为发电与输电、配电、用电同时完成的能量。因此传统电力系统对新能源的接纳能力分析，就变的非常必要。
- 风力发电、光伏发电等新能源发电具有间歇性、波动性、随机性的特点，给电力系统安全、稳定、可靠运行带来了新的挑战。其并网容量超过某一阈值时，就会破坏电力系统的稳定运行。

# 1. 穿透功率极限的概念

- 两类定义

- 在1998年的国际大电网会上J. E. Christensen等人提出的风电场穿透功率极限指系统所能接受的风电场最大容量和系统最大负荷的比值。
- 而R. A. Schlueter等人将风电场穿透功率极限定义为系统所能接受的风电场最大容量与系统装机容量的比值。



# 1. 穿透功率极限的概念

- 我国的定义

- 在满足系统安全、稳定、经济运行的约束条件下，电力系统可消纳新能源发电的最大容量占其最大负荷的百分比。
- **穿透功率极限** =  $\frac{\text{新能源最大容量}}{\text{系统最大负荷}} \times 100\%$ 
  - 区别于**渗透率**（Penetration Level）的概念：**新能源装机容量占系统总负荷的比例**。
- **穿透功率极限**是衡量系统对新能源**消纳能力**的重要指标。

# 1. 穿透功率极限的概念

- 新能源渗透率（Penetration Level）增高的负面影响：
  - 风电场并网容量的增加，即渗透率的增加，会使系统电压和频率产生偏差、电压发生波动和闪变、电压稳定性受到影响等；
  - 并且，系统为减小风电场发电间歇性对系统的影响必须增加旋转备用容量，因此会使系统可靠性和经济性下降。

# 穿透功率极限的近似计算

- 当新能源发出的功率注入电力系统后，忽略新能源发电接入所带来的有功功率损耗变化，对于系统发电机组、负荷及有功功率损耗的功率平衡关系，有：

$$P_{wind}(t) + \sum_{i=1}^N P_{uti} - \sum_{i=1}^M P_L(t) - \Delta P(t) = 0$$

- 当新能源发电的容量不断增加时，常规机组的输出功率将不断降低，直达到达到常规机组的出力下限为止。在电网中，满足约束条件的机组组合有多个，对于不同的发电机组组合，其出力下限的值并不相同，因此，可以对机组组合进行优化，求解出在该时刻能使电网最大限度消纳新能源发电容量的机组组合及与之对应的穿透功率极限。

## 穿透功率极限的近似计算

- 设电网中发电机组有 $N$ 台，第 $i$ 台机组的有功出力为 $P_{ut}$ ，出力区间为 $[P_{utmin}, P_{utmax}]$ ，设 $N$ 维向量 $U=[u_1, \dots, u_i, \dots, u_N]$ 为发电机组的状态向量，0表示停机，1表示开机；得到 $t$ 时刻新能源发电的穿透功率极限为：

$$P_{wind}(t) = \max_{U_i \in \Omega} \left( \frac{\sum_{i=1}^M P_L(t) + \Delta P(t) - U_t P_{utmin}^T}{p_{wind}(t) \cdot P_{Lmax}} \times 100\% \right)$$

- 系统的负荷与新能源发电的功率输出均是关于时间的函数，因此，电力系统在不同时间断面对新能源发电的消纳能力也并不相同。为保证系统的安全稳定运行，应将穿透功率极限最小的那个时间断面的穿透功率极限值，作为该时间段的新能源发电穿透功率极限：

$$P_{wind}(t) = \min_{t_{on} \leq t \leq t_{off}} \max_{U_i \in \Omega} \left( \frac{\sum_{i=1}^M P_L(t) + \Delta P(t) - U_t P_{utmin}^T}{p_{wind}(t) \cdot P_{Lmax}} \times 100\% \right)$$

## 2. 穿透功率极限的计算方法

- 1) 暂态稳定分析算法

- 应用动态仿真，检验在几种典型的运行方式下，满足电网安全稳定性要求，系统可以接受的最大风电装机容量，从而得到风电场的穿透功率极限。
- 用于研究风电场和系统之间的相互影响，考虑到系统的各种运行方式和扰动条件，这种方法一般需要对系统的动态稳定性进行校验，因此需要的仿真次数较多，是一种验证性的计算方法。

## 2. 穿透功率极限的计算方法

- 2) 频率约束规划算法

- 如果风电场接入的系统规模较小，风电的随机波动性和不稳定性对电网频率的影响就较大，这时限制风电穿透功率的主要因素是频率波动和稳定性。
- 如何调节常规机组使系统的频率变化保持在允许范围内，是正在研究的一个热点，尤其是针对智能电网和微电网。

## 2. 穿透功率极限的计算方法

### • 3) 随机规划算法

- 所考虑的约束条件主要是常规机组的出力约束、输电线路的功率传输极限和系统所要求的旋转备用水平，并将线路输送能力的约束和系统旋转备用约束以概率的形式给出。
- 随机规划方法，其求解风电穿透功率极限的数学模型如下：

$$\begin{cases} \text{Pr ob}\{g(u, P_w, P_g, P_d) \leq P_{l \max}\} \geq \alpha \\ \text{Pr ob}\{c^T (P_{g \max} - P_g) \geq P_{sr}\} \geq \beta \\ P_{g \min} \leq P_g \leq P_{g \max} \\ \sum_i P_w + \sum_j P_{gj} - \sum_k P_{dk} = 0 \end{cases}$$

## 2. 穿透功率极限的计算方法

- 4)其他优化算法

- 也可采用其他智能类优化方法，把问题归结为在系统静态安全约束下的风力发电功率最大化问题，在确定系统风电准入功率极限的同时，还可以给出电力系统内其它常规机组的最优运行调度方案。

- 一种是先假设一个容量值，然后仿真校核系统的安全稳定性，根据仿真结果对容量值进行修正。
    - 另一种是在各种约束条件下，直接对穿透功率极限进行优化。



### 3. 提高穿透功率极限的措施

- ◆ 当前制约系统风电穿透功率水平的主要原因之一是，风电功率注入引起的节点电压超限。
- ◆ 另外，风电穿透功率极限是系统的网络结构、负荷水平、机组的最小出力限制、系统对电压水平的要求、风电场无功补偿容量等因素综合作用的结果。
- ◆ 加强系统网络结构、合理调整系统运行方式、适当增加风电场的无功补偿容量有利于提高风电场的最大可注入功率和风电穿透功率极限。
- ◆ 其它？



## 4. 电源规划与新能源电源规划

- 本节重点：
  - 电源规划中电厂的合理规模
  - 电力市场环境下新能源的优化规划计算方法
- 电源规划领域的新问题
  - 电力负荷的增长
  - 电力系统的规模和发电机组单机容量不断增大
  - 发电机组类型及所采用的一次能源的多样化（电源的结构日趋复杂）

# 一、 电源规划的基本目标

- 电源规划的需求： 电力负荷的增长（国民经济的发展）
- 电源规划的任务： 根据某一水平年负荷预测和电力电量平衡的结果，在满足一定可靠性水平的条件下，寻求一个最经济的电源建设方案，确定出电力系统内电源的类型、结构、分布。
- 电源规划与机组组合Unit Commitment的区别： 建设规划和运行调度。

- 电源规划的分类

- 1) 短期电源规划

- 制定发电设备的维修计划;
    - 分析推迟或提前新发电机组投产计划的效益;
    - 分析与相邻电力系统互联的效益及互联方案;
    - 确定燃料需求量及购买、运输、贮存计划。

## ◆2) 长期电源规划

- ◆何时、何地扩建新发电机组；
- ◆扩建什么类型及多大容量的发电机组；
- ◆现有发电机组的退役及更新计划；
- ◆燃料的需求量及解决燃料问题的策略；
- ◆采用新发电技术（如太阳能发电）的可能性；
- ◆采用负荷管理对系统电力电量平衡的影响；
- ◆与相邻电力系统进行电力交换的可能性。

# • 电源规划中电厂容量的选择

## — 目的：

- 确定每个拟建电厂的建设规模，是下一步做系统电源规划方案的基础。

## — 主要内容：

- 影响电厂容量的主要因素
- 水电站装机容量选择
- 热电厂容量选择
- 抽水蓄能式电站容量选择
- 凝汽式电厂容量选择

- 电源规划中电厂容量的选择

- 影响电厂容量的主要因素：

- 规划地区即电厂供电地区负荷的影响
    - 动力资源条件的影响（如风能资源分析）
    - 厂址条件的影响（如风场占地等）
    - 系统规模的影响
    - 设备规模及供应条件的影响

## 二、电源规划模型

### ◆电源规划的要求：

◆确定合理的电源结构；

◆协调和有效利用各种类型的电源；

◆克服传统的电源规划方法由于其理论局限性并受到计算工具的限制，只能以确定性的电力电量平衡为基础拟定方案进行简单比较的缺点。

◆电源规划通常由**投资决策**和**生产模拟**两部分构成。



# 1. 电源规划模型的特点

- 电源规划模型应能对以下问题作出**定量分析**:
  - ①规划方案的投资流及逐年运行费用;
  - ②方案所需的一次能源及燃料费用;
  - ③系统的供电可靠性指标;
  - ④规划方案对负荷增长速度、燃料价格等不确定因素的灵敏度;
  - ⑤与相邻电力系统互联的效益及费用;
  - ⑥推迟某些关键电源项目的经济损益。

- 电源规划建模的简化和假设：
  - 忽略如社会和政治因素等难概括到数学模型中的因素。
- 电源规划模型的特点：
  - ①高维数。电源规划需要处理各种类型的发电机组，并要考虑相当长时期（可达30年以上）系统电源的过渡问题。这样在规划中所涉及的决策变量是多得惊人的。这种维数障碍使我们往往难以直接应用运筹学中的典型算法。

②**非线性**。发电机组的投资现值和年运行费用都不是有关决策变量的线性函数。此外，一些约束条件，例如可靠性约束条件，也是非线性的。因而电源规划的数学模型实质上是非线性的，给求解带来很大的困难。

③**随机性**。电源规划所需的基础数据，如负荷预测数据、燃料和设备价格、贴现率等都包含不确定性因素，从而使电源规划问题具有明显的随机性质。这样我们不仅要寻求最优电源开发方案，还应对方案进行一系列灵敏度分析，增加了电源规划问题的复杂性。

## 2. 电源规划的数学模型的一般形式

$$\min \quad f(X, Y)$$

$$s.t. \quad h_i(X) \leq a_i$$

$$g_i(Y) \leq b_i$$

$$k_i(X, Y) \geq c_i$$

$$X \geq 0, Y \geq 0$$

◆  $X$ 为发电机装机容量;

◆  $Y$ 为发电机出力变量;

◆  $a_i, b_i, c_i$ 为常数。

式(1) 为目标函数;

式(2) 为电源建设的施工约束;

式(3) 为运行约束;

式(4) 为发电机出力受发电机最小技术出力的限制;

式(5) 为数学模型本身要求的变量约束。

- 当将 $f(X, Y)$ 与 $g_i(Y)$ 均处理为线性且 $X$ 为连续变量时，就构成了电源规划的线性模型；若允许存在非线性关系，就构成了非线性模型；
- 若 $X$ 部分或全部为整数变量时，就构成了整数规划模型；
- 如果考虑时间推移，求得整个时间序列上的最优方案，则构成动态模型；
- 若不考虑整体优化，而只是一阶段一阶段的进行优化，就是逐阶段优化模型；
- 若在模型中考虑一些随机因素，则形成随机模型；若将各种随机因素作为确定量处理，则构成确定性模型。

# 目标函数：

- 目标函数，一般取为系统总支出费用最小，包括两个部分：
  - 第一部分与安装发电机组容量有关，如发电厂的**投资费用**；
  - 另一部分与发电机的实际出力有关，如发电厂的**运行费用**，其中主要有发电厂的燃料费用；
  - 实用中，规划目标不仅只是投资和运行费用，一般还包括其他效益和支出，即电源规划是一个**多目标优化问题**。

### 3. 电力市场环境大规模风电、光伏并网的电源规划模型

- 引入机组的**环境效益**，以国民经济投入最小为目标，建立**电力市场环境大规模新能源风电、光伏并网系统电源规划模型**：

$$\begin{aligned} \min O = & \sum_{t=1}^N [(\sum_{i=1}^{N_h} \alpha_{it} X_{it} + \sum_{s=1}^{N_s} \beta_{st} Y_{st} + \sum_{j=1}^{N_f} \lambda_{jt} Z_{jt} + \sum_{g=1}^{N_g} \nu_{gt} W_{gt}) + \\ & G_t + C_{Rh} (\sum_{i=1}^{N_h} \Lambda_{it} X_{it} + \sum_{\alpha=1}^{N_{h0}} e_{\alpha t}) + C_{Rs} (\sum_{s=1}^{N_x} \Gamma_{st} Y_{st} + \sum_{\beta=1}^{N_{s0}} f_{\beta t}) + C_{Rf} (\sum_{j=1}^{N_f} K_{jt} Z_{jt} + \sum_{\gamma=1}^{N_{f0}} g_{\gamma t}) \\ & + C_{Rg} (\sum_{\phi=1}^{N_g} M_{\phi t} W_{\phi t} + \sum_{\phi=1}^{N_{g0}} h_{\phi t}) + \sum_{k=1}^{M_t} \delta_k |\gamma_k E_k| + (T_{ch} + T_{qh})] \end{aligned}$$

- 目标函数各参数的意义：
  - $N$ 为规划年限；
  - 字母下标中 $h$ 、 $s$ 、 $f$ 、 $g$ 分别代表火电、水电、风电和光伏机组；
  - $N_h$ 、 $N_s$ 、 $N_f$ 、 $N_g$ 为待建的机组类型数；
  - $M_t$ 为第 $t$ 年的投运机组数；
  - $\alpha_{it}$ 、 $\beta_{st}$ 、 $\lambda_{jt}$ 、 $\nu_{gt}$ 为发电机组在第 $t$ 年投产的固定投资费用；
  - $X_{it}$ 、 $Y_{st}$ 、 $Z_{jt}$ 、为各种类型机组在第 $t$ 年投产的台数；
  - $G_t$ 为首次电厂所需的必要的附加投资以及机组的检修与维护费用总和；
  - $C_{Rh}$ 、 $C_{Rs}$ 、 $C_{Rf}$ 、 $C_{Rg}$ 为资金回收系数；
  - $\Lambda_{it}$ 、 $\Gamma_{st}$ 、 $K_{jt}$ 、 $M_{gt}$ 为发电机组在第 $t$ 年的年运行费用；
  - $N_{h0}$ 、 $N_{s0}$ 、 $N_{f0}$ 、 $N_{g0}$ 分别为原有火电、水电、风电和光伏机组数；
  - $e_{\alpha}$ 、 $f_{\beta}$ 、 $g_{\gamma}$ 、 $h_{\varphi}$ 为原有发电机组在第 $t$ 年的年运行费用；
  - $\delta_k$  为机组 $k$ 的环境友好系数；
  - $\gamma_k$  为机组 $k$ 单位发电量的环境价值；
  - $E_k$  为机组 $k$ 的年发电量；
  - $T_{ch}$  为存货成本；
  - $T_{qh}$  为缺货成本。



约束条件:

### (1) 备用容量或可靠性约束

$$\sum_{j=1}^m X_{jt} + P_{s0} - P_{\max t} (1 + \rho + \sigma) \geq \Delta B_t \quad t = 1, 2, \dots, T$$

$X_{jt}$  ——新建电厂 $j$ 在 $t$ 年新装机容量;  $P_{s0}$  ——系统原有装机容量;  $P_{\max t}$  ——系统在 $t$ 年的最大负荷;  $\rho$  ——电厂厂用电率;  $\sigma$  ——电网线损率;  $\Delta B_t$  ——系统在 $t$ 年应有的备用容量;  $T$  ——规划期年数;  $m$  ——待建电站数。

- 一般有两种方法计及可靠性指标：
  - 一种将可靠性指标计入约束中；
  - 另一种将其做某种处理，记入目标函数中。
- 通过对可靠性的具体分析可以从综合模型中得到**5个可靠性指标**：
  - 电力不足概率
  - 电力不足时间期望
  - 电量不足期望值
  - 停电频率
  - 停电持续时间

## (2) 电源建设施工约束

- ①待建电站年最大装机容量约束
- ②待建电站最大装机容量约束
- ③最早投入年限约束
- ④财政约束，即某个时期内地电源建设不应该超过财政支付能力
- ⑤待建电站装机连续性约束，即电站第一台机组投入运行后，后续机组应该连续安装，否则会给施工带来麻烦
- ⑥建设顺序约束，某些电站建设有先后顺序
- ⑦待建电站最晚投入年限约束
- ⑧待建电站厂址互斥约束等

### (3) 系统运行约束

- ①系统需求约束，即任何时候系统发电容量总和要满足系统电力需求
- ②发电机组最大、最小出力约束
- ③火电厂燃料消耗约束
- ④水电站水能利用约束
- ⑤风电场风能利用约束
- ⑥光伏电站太阳能利用约束
- ⑦最早可投运年限约束，受施工及制造能力等客观条件所影响的机组最早可投运时间的限制。
- ⑧可靠性约束，保证电力最基本的安全可靠性要求。
- ⑨大规模风电、光伏并网后的调峰约束
- ⑩市场竞争力投资约束

### 三、电源规划的求解算法

◆求解电源规划问题的方法很多，归纳起来有以下几种：

- ◆线性规划法
- ◆非线性规划法
- ◆动态规划法
- ◆二次规划法
- ◆混合规划法
- ◆内点算法
- ◆人工智能方法

# 1. 线性规划

- 基本思路是：将模型线性化，运用某种线性规划算法的改进算法求解。
- 根据优化中对整数变量的处理，线性规划模型分为：普通线性规划模型和线性混合整数规划模型。
- 线性规划的解法——单纯形法，由Dantzig于1947年提出。

- 由于规划期一般都相当长，为减少决策变量，可以把规划期分段，求得每一段的最优解，虽然这样得不到全局最优解，但可以在相对短的时间内得到一个参考方案。
- 线性规划在电力系统电源规划中被大量使用，其基本思路是：将模型线性化，运用某种线性规划算法的改进算法求解。根据优化中对整数的处理，线性规划模型分为：
  - 普通线性规划模型(单纯形法)
  - 线性混合整数规划模型(分支定界算法或割平面法)

# 线性规划的优缺点

- 优点：

- 使用最广泛
- 有大量成熟的模型和通用的求解方法
- 计算比较简单
- 解题规模较大

- 缺点：

- 电力系统中很多问题是非线性的，必须将其线性化，这将带来误差；
- 在处理不等式约束时有一定的困难；
- 对于大型问题，不容易确定其初始可行解；
- 整数规划或混合整数规划问题的求解非常费时且需要较大的内存容量，所以模型的应用受到了限制。



## 2. 非线性规划

- 非线性来源:
  - 电源规划目标函数中，新增设备投资和发电费用都是决策变量的非线性函数。
  - 负荷是波动的，增加了目标函数的非线性。
- 定义:
  - 目标函数或约束条件中包括一个或多个非线性函数的规划问题称为非线性规划。

- 非线性规划问题比线性规划问题复杂，最优解一般不在约束多边形的角点，甚至不在其边界上，可能在约束区域的任何位置，另外，非线性规划问题的求解可能陷入局部最优解。
- 求解方法：
  - 一类是把非线性问题转化为线性问题来求解，如泰勒级数展开法；
  - 另一类是直接求解法，如罚函数法。常用的具体算法有：微分法，拉格朗日乘子法，牛顿法，梯度法，变尺度法及基于变分法的优化方法。

# 非线性规划存在的主要问题

- ①非线性规划要求函数连续，有的算法还要求可导，而电源规划中的决策变量如投运机组等是不连续的，按连续函数计算后进行归整处理，会带来误差；
- ②非线性规划要求凸函数，而电源规划的目标函数和约束条件并不是在任何条件下都是凸的；
- ③非线性规划算法不少，但没有一类是普遍有效的，这给选择算法带来困难；
- ④非线性规划算法所求结果一般都是局部最优解，而电源规划的对象投资巨大，全局最优与局部最优投资相差可能是巨大的。

### 3. 其他优化方法

- 动态规划法

- 二次规划法

- 混合规划法

- 内点算法

- 人工智能方法等

- 方法均不作详细要求，课后了解。

