

电力系统潮流计算



广东电力交易中心

□ 通过潮流计算、电力系统运行原理的学习，了解电力潮流分布、电力系统调度运行对市场交易的影响，有助于加深对电力市场尤其是电力现货市场交易原理的认识。通过本门课程学习，帮助学员达成以下目标：

01

了解电力系统潮流的概念和潮流计算的基本过程；对潮流分布如何影响市场交易结果的过程有更深入的认识；了解电力系统中的有功功率分布简化计算的方法。

02

了解电力系统需求预测的基本内容及市场化背景下电力需求预测的影响；熟悉电力系统平衡的概念和实现功率平衡的基本方法，涵盖有功、无功平衡两个方面内容。

03

了解传统调度模式以及市场环境发电计划编制的差异，中长期和日前发电计划编制的基本原理，对计划向市场转变过程中，系统运行管理、决策机制的变化有初步的了解。

04

了解实时发电计划的编制原理，电力系统实时控制的必要性和方法。

目录



电力系统潮流计算的基本原理



电力系统的平衡



发电计划编制的基本原理

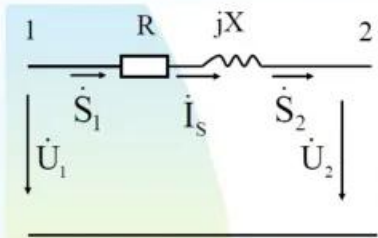


电力系统实时运行与控制

一、电力系统潮流计算的基本原理

电力系统基本概念

- **电压**：水位，决定系统功率传输能力，伏特V
- **电流**：水流，决定系统功率传输流量，安培A
- **有功**：货物，单位时间传输的能量，瓦特W、kW
- **无功**：水体，承载能量传输，乏Var
- **功率**：流速，单位时间流过的量，瓦特W
- **电量**：总量，功率的积累值，兆瓦时，MWh
- **电阻**：阻力，有功传输的阻碍和损耗
- **电抗**：礁石，无功传输的阻碍和损耗



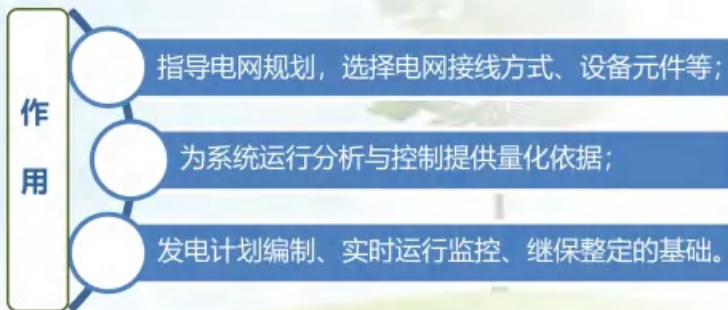
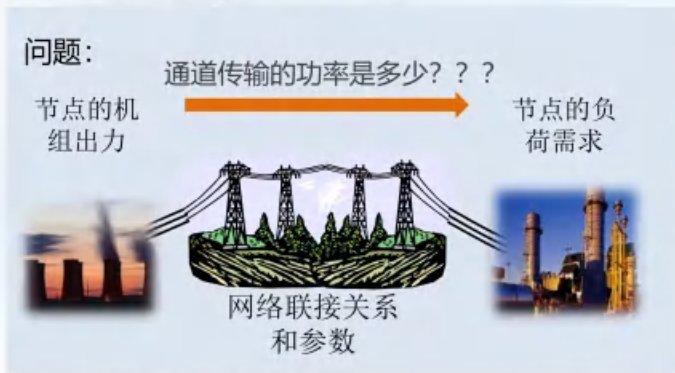
有功、无功、电压幅值、相角



一、电力系统潮流计算的基本原理

1、潮流计算——潮流概述

- ◆ **电力系统潮流的概念**——表征电功率在电力网络中传输分布的整体情况。内容包括：电力网络中的各个节点注入电功率、各个输电传输通道（包括线路、断面）的传输功率与损耗，以及各个网络节点的电压幅值和相角等基本情况。



借助电力系统潮流计算，可以直观判断网络中各个设备元件的负载水平如何，电网运行是否安全稳定。

一、电力系统潮流计算的基本原理

1、潮流计算——潮流方程解法

- ◆ **已知：** 电力网络的元件参数及其连接关系，各节点负荷的有功、无功需求，机组的有功功率输出，以及部分机组的无功功率或者电压数值。
- ◆ **求解：** 系统中全部母线节点的电压，网络中的功率分布，以及功率损耗。

◆ 交流潮流法

- **优点：** 计算精确，考虑无功分布、损耗分布的情况；
- **缺点：** 非线性难以处理，求解速度慢。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - V_i \sum_{j=1}^{n-1} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - Q_i = Q_{is} - V_i \sum_{j=1}^m V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases}$$

◆ 直流潮流法

- **应用场景：** 在发电计划优化和现货市场出清过程中，关注的是系统有功潮流分布，不需要计算节点电压幅值。
- **特点：** 化简为求解线性方程组，对计算精度要求不高，求解速度快。



简化前提条件

- 电抗 (X) >> 电阻 (R)
- 节点电压 ≈ 1
- 支路两端的相角差 ≈ 0

一、电力系统潮流计算的基本原理

2、潮流分布对市场交易的影响——电力系统稳定与断面安全约束

- ◆ **电力系统稳定的概念**——根据电力系统的安全稳定运行的要求，需要对系统的**静态安全、静态稳定、暂态稳定、动态稳定、电压稳定、频率稳定、短路电流**进行计算与分析，据此检验电网的安全稳定水平，优化电网规划方案，提出保证系统安全稳定运行的控制策略和提高系统稳定水平的措施。

优化目标

最小化发电成本 = 运行成本+空载成本+启动成本

约束条件

■ 机组约束

- 出力上下限约束
- 爬坡速率约束
- 最小连续开停时间约束
- 最大启停次数约束

■ 系统约束

- 负荷平衡约束
- 系统正备用约束
- 系统负备用约束
- 系统旋转备用约束

■ 网络约束

- 线路潮流约束
- 断面传输极限约束

一、电力系统潮流计算的基本原理

2、潮流分布对市场交易的影响——电力系统稳定与断面安全约束

■ 根据《电力系统安全稳定导则》要求，

- 在电力系统的正常运行方式下（含计划检修方式），所有设备均应不过载、电压不越限，系统中任一元件（发电机、线路、变压器、母线）发生单一故障时，应能保持系统安全稳定运行。
- **N-1原则**：任一元件无故障或因故障断开，应能保持稳定运行和正常供电，其他元件不过负荷，电压和频率均在允许范围内。

断面：是电网的薄弱环节，对某些相关性较强的设备、元件的功率需要进行综合控制，元件组合称为断面。

N-1断面——为满足N-1原则而设置的安全约束断面称之为N-1断面。

- ◆ 例：如果仅考虑线路传输限额，假设单线的传输限额为30MW，机组P1出力不能达到60MW。
- ◆ 如果假设甲乙线N-1断面限额为30MW，机组P1出力仅能保持在30MW。

DL
备案号：8887—2001

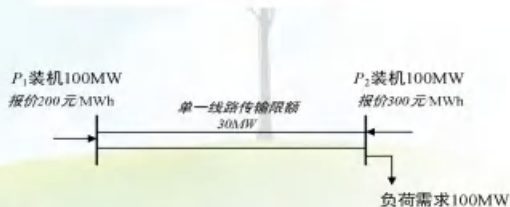
DL

中华人民共和国电力行业标准

DL 755—2001

电力系统安全稳定导则

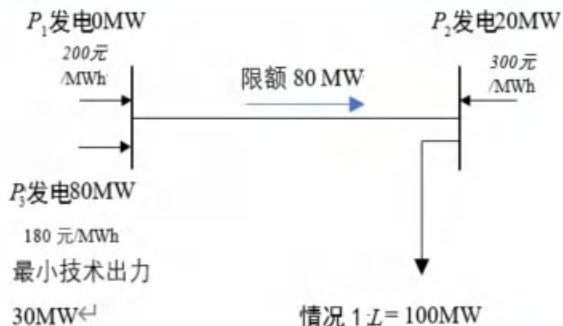
Guide on security and stability for power system



一、电力系统潮流计算的基本原理

2、潮流分布对市场交易的影响——潮流分布的影响分类

- ◆ **对发电安排的影响**——由于某些机组对关键线路或断面的潮流分布影响较大，要求这部分机组的出力必须维持在一定水平范围内，以避免线路或断面的潮流越限。因此产生了部分必开、必停机组，以及部分机组群出力的上、下限约束。



- **例：**负荷需求为100MW，由于输电线路达界， P_1 、 P_3 只能共发出80MW，额外需要 P_2 发电，所以为了满足供需实时平衡， **P_2 机组为必开机组。**

但是： P_2 机组的最小技术出力为60MW；
 P_1 机组的最小技术出力为50MW；
 P_3 机组的最小技术出力为30MW；

所以： P_1 为必停机组

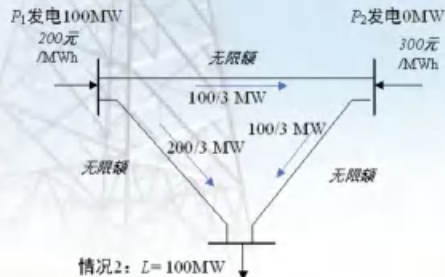
一、电力系统潮流计算的基本原理

2、潮流分布对市场交易的影响——潮流分布的影响分类

- ◆ **对出清电量的影响**——影响各机组的中标电量，如果潮流分布达到了某一线路、断面的限额要求，可能使得部分报价低的机组发电量不能中标，改而调用负荷中心区域的机组，会抬高调度的总成本。

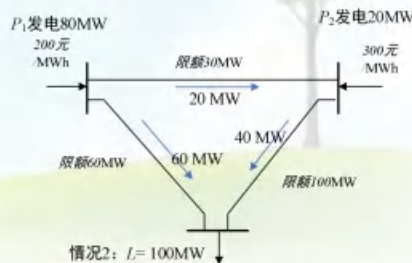
无安全约束

100MW的负荷应该尽量由P1发电机提供；
调度总成本为：
 $100\text{MW} \times 200\text{元/MWh} = 20000\text{元}$ 。



有安全约束

P1机组的送出能力最多只能达到80MW，剩余20MW需由P2机组提供；
调度总成本为：
 $80\text{MW} \times 200\text{元/MWh} + 20\text{MW} \times 300\text{元/MWh} = 22000\text{元}$

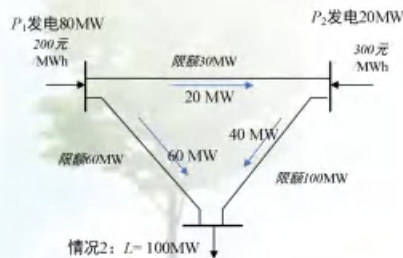


一、电力系统潮流计算的基本原理

2、潮流分布对市场交易的影响——潮流分布的影响分类

- ◆ **对出清价格的影响**——在采用节点电价的定价模式下，达界线路、断面有影响的节点价格中，会产生不为零的阻塞分量，导致不同节点的电价不同。送入受阻地区的节点电价较高，送出受阻地区的节点电价较低。

- 场景（2）中，如果电力市场采用节点边际定价机制，将导致P1机组所在节点和负荷所在节点的电价中，产生不为0的阻塞分量，最终算得的影子价格不为0，那么就会进一步影响最终出清电价。



潮流分析在市场交易组织的作用：

- 为节点电价出现差异提供解释，监控市场合理的价格；
- 为中标量价的差异提供解释，保障和验证市场交易结果的客观和准确性；
- 量化评估不同主体的发、用电情况对电网运行经济性、可靠性的影响；
- 帮助合理设计市场机制，保障市场交易的公平性。

一、电力系统潮流计算的基本原理

3、潮流方程的简化应用——有功灵敏度系数

◆ 现货市场出清模型

优化目标

最小化发电成本 = 运行成本+空载成本+启动成本

约束条件

■ 机组约束

- 出力上下限约束
- 爬坡速率约束
- 最小连续开停时间约束
- 最大启停次数约束

■ 系统约束

- 负荷平衡约束
- 系统正备用约束
- 系统负备用约束
- 系统旋转备用约束

■ 网络约束

- 线路潮流约束
- 断面传输极限约束

机组出力、负荷需求



传输下限 $\leq$ 传输功率 $\leq$ 传输上限



一、电力系统潮流计算的基本原理

3、潮流方程的简化应用——有功灵敏度系数

◆ **发电转移分布因子(GSDF)** ——表达某一节点的有功注入增加一个单位（同时，平衡节点的有功注入减少一个单位）时，引起该线路上传输有功变化的数值，也简称**有功灵敏度系数**。

➤ **线路潮流**可以表示为如下形式：

$$-\underline{L_{k \max}} \leq \sum_{i \in M_t} \underline{G_i} P_{Gi,t} + \sum_{j \in N_t} \underline{G_j} P_{Gj,t} \leq \underline{L_{k \max}}$$

—— 灵敏度系数

—— 线路的功率限额

“有功灵敏度”线性表达机组、负荷所在节点的注入有功功率大小对各断面、线路传输功率的影响，从而使得出清模型直接求解的结果，近似满足电网安全约束的要求。

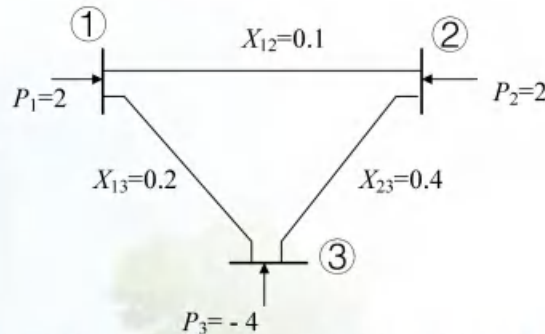
在发电计划优化和现货市场出清过程中，避免非线性化的电网安全约束表达式带来的计算求解难题。

一、电力系统潮流计算的基本原理

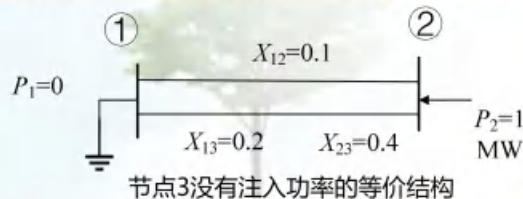
4、有功灵敏度的计算与应用示例——计算过程和物理意义

◆ 举例——灵敏度系数的计算和应用

已知： 3节点网络的线路电抗如图，节点1作为平衡节点，节点2注入功率2MW，节点3的注入功率为-4MW，如何分析网络中的功率分布？



- **步骤1：** 电网中存在平衡节点，一般是具有较强的调节能力的发电机所在的节点，不考虑其对潮流分布的影响，平衡节点接地。
- **步骤2：** 选择某一节点的注入1个单位功率，其它节点的注入功率为0，可以分析各支路的功率分布。

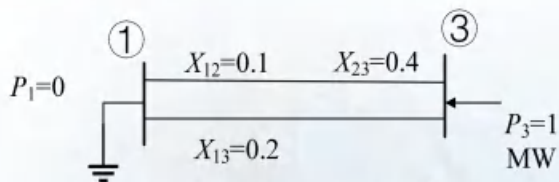


$$\left\{ \begin{array}{l} P_{21} = \frac{X_{13} + X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}} P_2 = \frac{6}{7} \\ P_{23} = P_{31} = \frac{X_{12}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}} P_2 = \frac{1}{7} \end{array} \right.$$

	L_{12}	L_{13}	L_{23}
P_2	-6/7	-1/7	1/7
P_3	?	?	?

一、电力系统潮流计算的基本原理

4、有功灵敏度的计算与应用示例——计算过程和物理意义



$$P_{31} = \frac{X_{12} + X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}} \times P_3 = \frac{5}{7}$$

$$P_{21} = P_{32} = \frac{X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}} \times P_3 = \frac{2}{7}$$

	L_{12}	L_{13}	L_{23}
P_2	$-6/7$	$-1/7$	$1/7$
P_3	$-2/7$	$-5/7$	$-2/7$

步骤3: 根据灵敏度系数计算支路的传输功率:

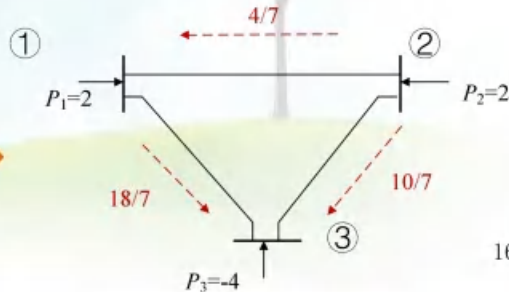
线路传输功率 = 发电机/负荷节点的功率 × 节点对线路的灵敏度系数

线路 L_{12} 传输功率: $PL_{12} = P_2 \cdot (-6/7) + P_3 \cdot (-2/7) = -4/7$

线路 L_{13} 传输功率: $PL_{13} = P_2 \cdot (-1/7) + P_3 \cdot (-5/7) = 18/7$

线路 L_{23} 传输功率: $PL_{23} = P_2 \cdot (1/7) + P_3 \cdot (-2/7) = 10/7$

简单系统的潮流计算的结果



目录



电力系统潮流计算的基本原理



电力系统的平衡



发电计划编制的基本原理



电力系统实时运行与控制

二、电力系统的平衡

1、电力需求预测

□ 电力需求预测的基本概念——

- 一般称为负荷预测，是指根据系统的运行特性、增容决策、自然条件与社会影响等诸多因数，在满足一定精度要求的条件下，确定未来某特定时刻或时段的负荷数据。
- 电力需求预测包括**电力预测**和**电量预测**两个方面，电力预测是针对各个时段内负荷需求容量的预测，电量预测是针对某一时段内的电量需求的预测。

未启动现货交易前

- 对全网的电量需求、电力需求预测相对准确即可，根据实际情况将电量需求分摊至每一台机组，通过三公调度、节能发电调度的模式完成发电计划编制和执行。

VS

启动现货交易后

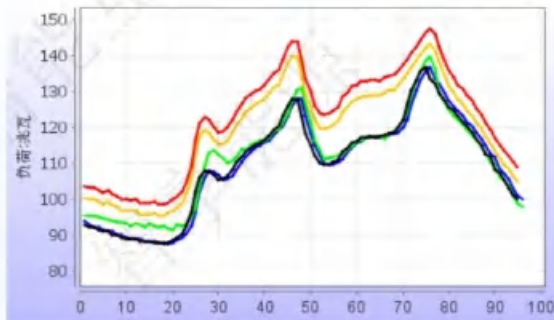
- 需要对各个节点的电量需求、电力需求准确预测。因现货市场出清以成本最小/社会福利最大化为目标，预测结果既影响全网的功率平衡，也影响线路/断面潮流约束是否达界的判断，从而影响市场的出清量、价。

二、电力系统的平衡

1、电力需求预测

◆ 电力需求预测的必要性——

- ◆ 准确的负荷预测，可以帮助经济合理地安排电网运行方式，安排机组的开停机方式，保持电网安全稳定，减少不必要的旋转储备容量，提高经济效益和社会效益。



- 1 最大/最小负荷
- 2 峰谷差
- 3 平均负荷



- 从地理分布来看，包括全网系统负荷的预测，也包括各个母线节点的负荷预测，当全网负荷预测值与所有母线负荷预测值不等时，需要对母线负荷预测结果进行调整。



- 从时间尺度上看，包括年度、月度（周度）、日前、实时负荷预测结果，负荷预测数值与真实负荷之间的偏差，一般会随着运行时间点的迫近越来越小，发电计划也会在不同时间尺度上予以调整。

二、电力系统的平衡

1、电力需求预测

- ◆ **备用容量的分类**——负荷预测值与真实的负荷需求可能存在偏差，需要预留一定的负荷备用；为应对实时运行中可能发生的故障引起的有功缺额，需要预留一定的事故备用。根据备用容量调节速率的快慢，主要分为旋转备用、非旋转备用；根据备用容量调节的方向，分为正备用、负备用。

■ 负荷备用

用于平衡瞬间负荷波动与负荷预计偏差的在线资源，应全部为旋转备用提供。

■ 事故备用

指平衡电力系统中发电和输电设备发生故障时，保证正常容量所需设置的发电容量；

■ 旋转备用

已经接在母线上，随时准备带上负荷的发电侧备用容量；

■ 正备用

在运机组最大技术出力扣除机组计划出力，表征系统应对有功缺额的调节能力

■ 负备用

在运机组计划出力扣除最小技术出力，表征系统应对有功过剩的调节能力。

二、电力系统的平衡

2、电力电量平衡

- ◆ **电力电量平衡的概念**——电力系统的平衡涵盖两个方面的内容：**电力平衡**，各个运行时点的电力供给、需求相等；**电量平衡**，一定时段范围内的电量供给、需求的平衡。

电力电量平衡的重要性



是保障发电容量的充裕性，确保正常的市场竞争关系是的必要条件。保障发电容量的充裕性，需要确认发电容量是否满足不同时段变化的用电需求，以及全部时段内的发电总量满足总的用电需求，供需紧缺程度直接影响到电力市场的竞争关系，因此要避免供需不平衡导致的市场失衡等现象。



是市场交易组织、编制发电计划的前提，也是评估电力系统辅助服务需量的依据。在遵循电网安全稳定运行、清洁能源消纳等原则下，维持电力电量平衡也是市场交易组织和发电计划编制需要满足的基本前提；电力电量平衡也是评估电力辅助服务（比如调峰、运行备用）是否满足要求的依据；

二、电力系统的平衡

2、电力平衡——瞬时平衡

◆ 实时运行阶段的有功平衡——电力系统频率控制

- 由于负荷需求具有随机性和波动性，无论如何，机组出力的调节与负荷需求的波动总会产生有功功率的偏差如下：

有功功率的偏差

$$P_{\text{发电}} = P_{\text{厂用}} + P_{\text{负荷}} + P_{\text{网损}}$$

$$P_{\text{发电}} + \Delta P_{\text{发电}} = P_{\text{厂用}} + P_{\text{负荷}} + P_{\text{网损}} + \Delta P_{\text{负荷}}$$



二、电力系统的平衡

2、电力平衡——高峰平衡

◆ 实时运行阶段的有功平衡——备用容量调用

- 如果实时运行过程中，与预测负荷相比实际用电发生大幅的增长，或电力系统发生故障（并网机组跳闸），会导致系统的有功平衡发生较大幅度的缺口，此时仅通过快速响应的调频容量不能满足系统有功平衡的要求。

备用容量的调用

正备用

- 能增加发电侧有功输出的容量资源，可以由在运机组未发电部分的容量，或者停运的机组来提供。
- 在运机组预留的正备用容量，等于机组的最大技术出力扣减机组的计划出力，全网的正备用等于在运机组的正备用容量之和。

旋转备用、非旋转备用

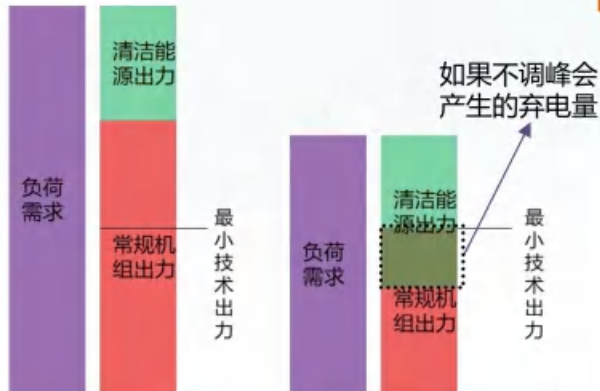
- 在运机组的未发电部分，且能够在一定时段内快速调用的容量资源。
- 旋转备用和非旋转备用，前者一般要求在10min内完全响应。在备用容量安排中，会对总的备用容量有限制设定，还会对旋备、非旋备的总量进行设定。

二、电力系统的平衡

1、电力平衡——低谷平衡

◆ 维持低谷平衡的手段——调峰资源的调用

- 如果实时运行过程中，由于水电风电、光伏等清洁能源机组出力发生较大幅度的增加，或者负荷需求发生较大幅度的降低，会导致发电侧供给容量有很大的剩余。需要在系统运行中预留一定量的负备用资源。



□（低谷）调峰的调用：是指常规机组通过灵活性改造，在清洁能源大发、负荷需求较小的结果，将出力调整至最小技术出力（有偿调峰基准）以下的服务。



$$\text{调峰容量} = \text{有偿调峰基准} - \text{机组出力}$$

- 低谷调峰需要考虑的问题：最小技术出力以下部分的单位发电成本陡增，需要调峰费用的补偿，并在合适的市场主体范围内分摊。

二、电力系统的平衡

2、电力系统的电量平衡

- ◆ **电量平衡**——在年度、月度、日前等时间维度上，根据系统电量需求的预测安排好机组的可用电量
的分配。



电量平衡的必要性

- 如果在年度、月度的计划时间维度没有做好电量平衡，会导致日前、实时阶段电网运行调节的压力增大，出现供不应求/供过于求，可能会产生市场机制效果失衡，清洁能源无法全部消纳等问题。

维持电量平衡的方法

1. 年度、月度电量平衡关系，应能大致满足全社会发电与全社会用电相等；
2. 市场化条件下，尽量保证市场及非市场的发、用电量相等；
3. 月度交易电量需求，主要根据市场化用电的月度电量需求扣减分解至该月的已签订的合约电量来确定；
4. 省内机组的总发电量加上联络线的受入电量，应该大于等于省内的用电量需求。



二、电力系统的平衡

4、电力系统的网损

- ◆ **网损**——正常的电能生产、传输过程中，在电力设备和线路上有电阻引起的有功功率的损耗，实际应用中有可能会高达5%或以上。由于电网输配电设备存在功率损耗，必然造成发电侧的上网电量超出用户侧的实际用电量，需要在市场结算机制上对网损引起的费用予以考虑。

在计划和市场模式下，网损费用的分摊方式存在区别：

□ 在计划模式下

- 通过不同机组类型的上网标杆电价、不同电压等级用户的销售目录电价，购销价差来覆盖网损费用支出。

□ 在市场环境下

- 由用户侧市场主体通过支付输配电价的方式来分摊，并在定期的输配电价核算环节，进行核准更新。
- 成熟市场环境下还有可能通过边际网损系数法来计算节点边际电价中的网损分量。

二、电力系统的平衡

5、电力系统无功平衡的调节

- ◆ **无功功率**——电力系统的无功功率包括感性无功和容性无功两种，感性无功功率是指电流相位滞后于电压相位，容性无功功率是指电流相位超前于电压相位。

在高压电网中，有 $R \ll X$ ，故无功的变化会引起电网节点电压的变化

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$$

供大于求： $\Delta Q_{\text{系统}} > \Delta Q_{\text{负荷}}$ → 节点电压升高

供小于求： $\Delta Q_{\text{系统}} < \Delta Q_{\text{负荷}}$ → 节点电压降低

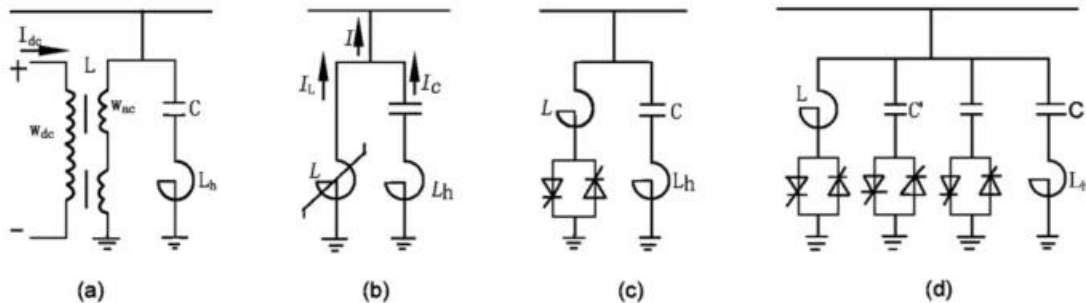
➤ 无功功率电源的配置，应该尽量满足就地匹配的原则，尽量减少无功的传输。

二、电力系统的平衡

5、电力系统无功平衡的调节

◆ 电力系统中的无功功率电源——无功功率的调整措施

- 电力系统的无功功率电源有发电机、同步调相机、静电电容器及静止无功补偿器，后三种装置又称为无功补偿装置；
- 无功调整对发电计划（现货市场）的影响——无功不足可能引起必开机组。



目录



电力系统潮流计算的基本原理



电力系统的平衡



发电计划编制的基本原理



电力系统实时运行与控制

三、发电计划编制的基本原理

1、发电计划编制概述

- 电力系统运行的两大任务是**电力电量平衡**和**电网安全约束管理**，核心目的都是确保**电网安全运行、电力可靠供应和资源优化配置**。
- **发电计划编制**是根据电网运行的边界条件，在满足电力电量平衡、机组特性约束、电网安全约束的基本要求的前提下，确定机组在不同时段的启停状态、出力大小。
- “计划”和“市场”只是实现的手段不同。

电力电量平衡调控

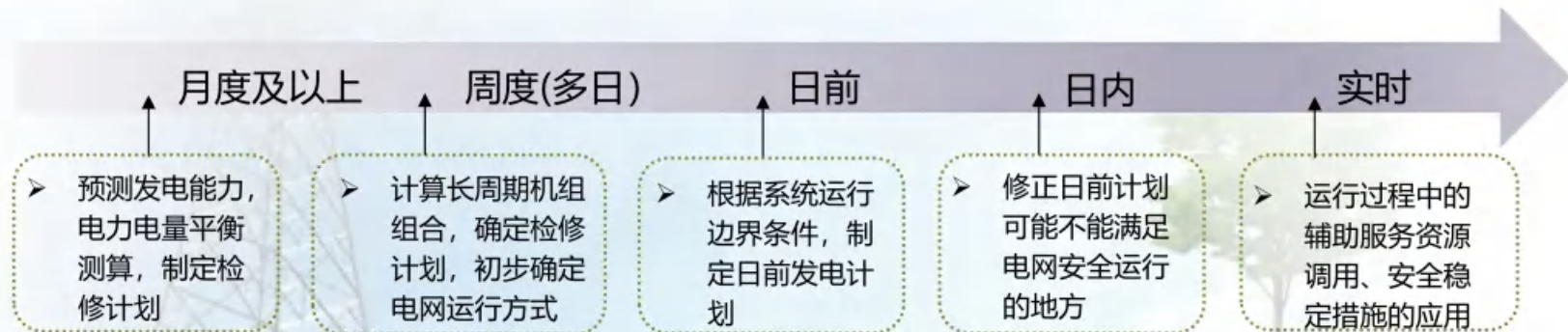
- 一是**总量匹配**，即总体发电资源是否满足全社会用电需求。
- 二是**个体分配**，在供需总量平衡的前提下，如何分配到单个发、用电主体，实现资源优化配置。

电网安全约束管理

- 一是**电网安全稳定**：电能输送不能超过电网最大送电能力，否则会导致设备损坏、电网失去稳定甚至崩溃，因此必须确保电能输送时刻满足电网安全约束。
- 二是**辅助服务充足**：除了满足用电需求外，为保障电网安全，还需要具有足够的调峰、调频、调压、备用资源。

三、发电计划编制的基本原理

1、发电计划编制概述



大致过程是：预测边界条件→初排发电计划→修正边界条件→修正发电计划

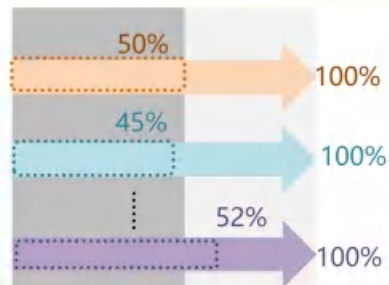
随着运行时间点的迫近, 边界条件越来越清晰, 但是发电计划中可以决策的量也越来越少

三、发电计划编制的基本原理

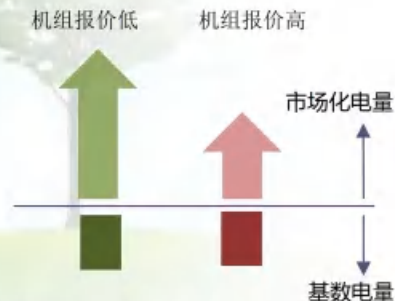
1、发电计划编制概述

- ◆ **传统模式下**，对机组设置年度基数电量，再在后续的月度、多日、日前调度计划过程中，根据“三公调度”的原则，等进度安排各台机组的执行电量，形成各台机组的发电计划。

- ◆ **市场化条件下**，参与市场化交易的机组电量成分包括基数电量和市场化电量，后者需要根据机组的报价出清后确定交易电量。进一步的，在现货市场模式下，市场化交易电量还需要分解到各时段执行，日前、实时发电计划的制定是以机组发电成本最小化（或全社会净效益最大化）为目标，安排机组的发电计划。



示例：机组的年度计划电量执行比例总体符合时间进度，个体同进度。



示例：市场化机组的电量分配趋势。

三、发电计划编制的基本原理

1、发电计划编制概述——发电计划编制的约束条件



1) 发电机组和电网设备的检修计划

- ◆ 设备检修对不同时段的网架结构产生影响，可能会导致某些线路、断面的改变、越限，则会直接影响发电计划编制的结果。

2) 系统和节点的负荷预测结果

- ◆ 当全网负荷预测值与所有母线负荷预测值不等时，需要对母线负荷预测结果进行调整，系统负荷等于各母线节点负荷的总和。

3) 新能源厂站预测出力

- ◆ 新能源厂站的预测出力，影响高峰时段、低谷时段的电力平衡，新能源占比高的地区尤其突出。

4) 区域联络线送电计划

- ◆ 跨省区输电通道上安排的区外送受电计划，会直接影响各区内部的电力、电量平衡情况，从而对发电计划的编制也产生直接的而影响。联络线计划一般是在跨省跨区市场交易完成后，作为省内发电计划编制（省内现货市场出清）的前置条件之一。

1、发电计划编制概述——发电计划编制的约束条件



5) 线路和断面的安全约束限值

- ◆ 线路和断面安全约束的限值设置，直接决定了在发电计划条件下潮流分布结果是否满足电网安全运行的要求。线路和断面的安全约束限值设置一般要参考电网在不同运行方式下的稳定控制要求来确定，是现货市场交易组织前需要确定的边界条件之一。

6) 系统正、负备用容量的要求

- ◆ 为了应对电网运行阶段可能面临的高峰平衡、低谷平衡的问题，需要在发电计划安排中考虑各时段的系统正、负备用容量充裕。

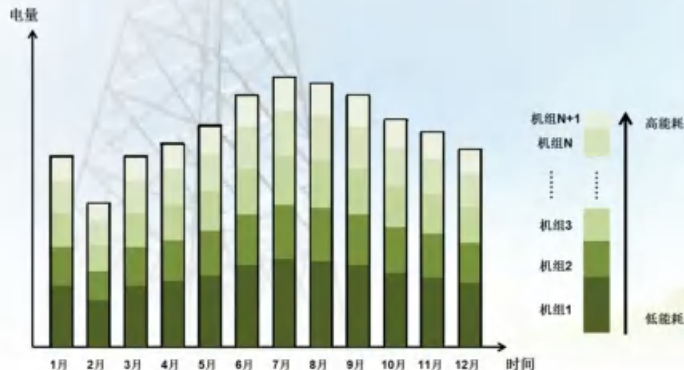
7) 机组的运行特性

- ◆ 主要从最大/最小技术出力、最小开停机时间、爬坡能力等方面对机组的运行特性予以考虑。在确定机组在各时段的启停状态、出力大小时，应满足上述运行特性约束的基本要求。

2、中长期发电计划编制

◆ 年度运行计划编制——上年末完成

- 考虑各机组的容量、能耗水平等因素，分配年度发电量计划，并结合中长期市场交易结果和各月电量需求预测，初步分解形成月度发电量，逐月分析电力电量平衡。
- 制定发电机组逐月检修计划，确保逐月电力电量总量平衡。
- 制定年度输变电设备检修计划，并初步分解到月度，逐月开展电网安全分析和校核。



- 年度运行方式分析细化到月度，准确性较多年运行方式大幅提升。
- ✓ 但年度运行计划，与实际运行仍然有较大的偏差，不能直接作为实际运行的依据。

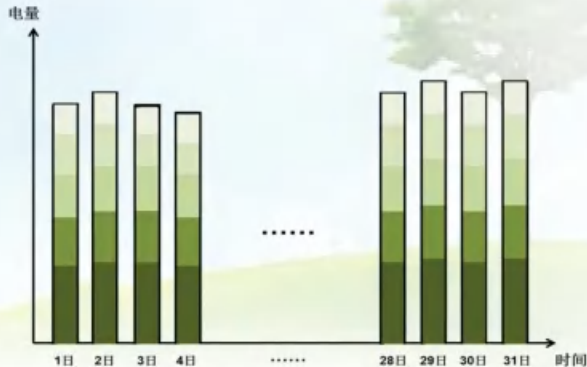
三、发电计划编制的基本原理

2、中长期发电计划编制

◆ 月度运行计划编制——上月末完成

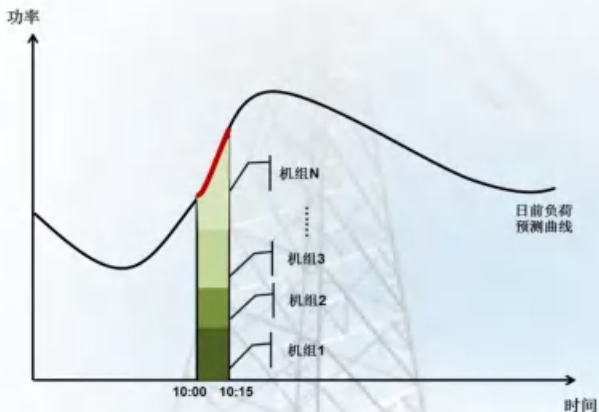
- 测算次月用电量与年分月计划的偏差，满足电网安全约束和清洁能源消纳的情况下，按照机组电量等进度执行原则，进行偏差修正，制定更为准确的机组月度发电量计划；
- 初步分解形成机组分日发电量计划，确保每日**电力电量总量平衡**；
- 对年分月检修计划进行调整，并初步分解到日。

□ 月度运行方式分析细化到日，电力电量平衡与电网安全约束管理精细水平进一步提升，与实际运行的偏差进一步缩小。



三、发电计划编制的基本原理

3、日前发电计划编制



传统调度模式下

□ 按照等进度执行计划电量

- 对次日每15分钟的负荷进行较为准确的预测（日前负荷预测曲线，96点）；
- 满足电网安全约束和清洁能源优先消纳的前提下，按照机组等比例完成计划电量的原则，精细分解到每15分钟，形成可执行的日运行计划。

电力现货市场模式下

□ 根据机组报价的高低来决定机组的发电计划

- 市场化机组在各个时段的发电启停、出力计划，需要根据机组的启停、运行报价，在满足调度运行边界涉及的各类约束条件的前提下，以总发电成本最小化为目标，优化计算得到次日各时段的机组启停、出力计划。

目录



电力系统潮流计算的基本原理



电力系统的平衡



发电计划编制的基本原理



电力系统实时运行与控制

四、电力系统实时运行与控制

1、实时发电计划编制

◆ 日内电力系统运行管理——

- 未来15min至数小时内的发电计划;
- 修正日前发电计划与实时运行的偏差。

非市场化机组：与传统模式相同

市场化机组：提交分段出力报价

基于SCED求解得到实时发电计划

① 获取实时发电计划的边界条件：

- 实时负荷预测;
- 线路、断面的有功限额;
- 新能源预测、联络线计划等。

② 构建并求解实时计划模型：

- 目标：经济最优;
- 约束：有功平衡、机组特性约束、电网安全约束等。

③ 针对发电计划，展开静态安全校核并输出结果：

- 交流潮流计算并校核;
- 基于节点电压，断面越限等情况，调整机组出力、开停情况。

四、电力系统实时运行与控制

2、电力系统实时调控

- ◆ **实时调控的必要性**——如果电力电量平衡出现了**负荷预测偏差、机组临时故障、电网设备临时故障、新能源发电出力波动**等或是**电网设备元件出现故障**时，实时调度运行中，影响电力电量平衡和电网安全约束的因素依然存在。

可能导致的问题

① 电网中的潮流分布发生改变，部分断面出现重载或者越限；

② 系统的电力电量平衡关系受到破坏。需要通过实时调控措施来消除潮流越限和功率的不平衡量。

四、电力系统实时运行与控制

2、电力系统实时调控

发电侧的输出功率 = 负荷需求 + 网损

- ◆ 电力供给 > 需求时，转矩带动机组的转速增加，从而导致系统频率升高；
- ◆ 电力供给 < 需求时，转矩带动机组的转速减小，从而导致系统频率降低；

实时监测系统电压、频率以及相关的稳定性指标；下达机组实时调节指令，必要时进行人工干预

自动控制
系统

- 在实际运行阶段，优先由自动控制系统自动调节机组出力来予以调整；

人工
干预

- 超出自动控制系统调节的部分需进行人工干预。

四、电力系统实时运行与控制

3、调频辅助服务的调用

调频辅助服务的种类与基本原理

一次调频——当系统频率偏离设定值时，机组调速系统动作调整负荷。

特点

动作快（0-60s）、时间短、有差调节。

作用

动作优先级最高，无条件跟踪频率变化（0.033），事后稳定频率的先锋队。



- “两个细则”规定一次调频为并网机组基本义务，对机组一次调频参数（速度变动率、死区等）做了明确规定，此项义务**有罚无奖**。

四、电力系统实时运行与控制

3、调频辅助服务的调用

调频辅助服务的种类与基本原理

二次调频——当电力平衡偏差使区域控制偏差（ACE）大于死区（240MW）时，通过自动发电控制系统（AGC）自动调整出力、修正平衡偏差量，达到新的电力平衡。

特点

变动周期更长（45s-5min）、功率变化更大；改变原动机出力，属于无差调节。

作用

动作优先级次高，是事后稳定频率的主力军。

三次调频——是指在达到系统频率稳定后，通过负荷需求在机组出力之间的重新分配，实现经济调度。

□ 在区域互联电网中，一般还将联络线频率偏差控制作为联络线功率调整的主要原则之一，以确保实时运行阶段各区域内的有功功率平衡状态不至于偏离标准范围以外。

四、电力系统实时运行与控制

4、电力系统实时潮流控制

◆ 实时运行阶段的安全约束——潮流控制

- 如果实时运行过程中，负荷用电需求发生突变，或电力系统发生故障（机组跳闸、线路故障跳闸），会导致系统的有功平衡发生变化，以及潮流分布发生改变。使得原来传输功率没有越限的线路发生越限。

- 需要对越限线路实施潮流控制，实际上，系统中的大部分节点的注入功率调整，都有可能缓解该越限潮流，怎么选取？

问题

方法

- 一般选择增降低有功灵敏度系数正值最大的机组出力，或增加有功灵敏度系数负值最小的机组出力，来消除越限。



四、电力系统实时运行与控制

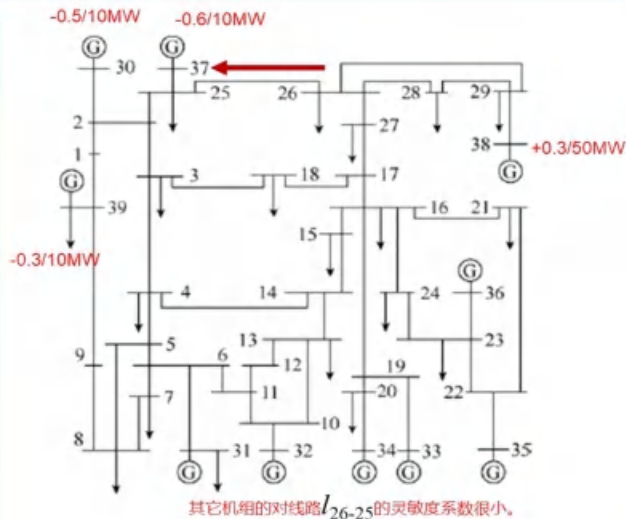
4、电力系统实时潮流控制

◆ 举例——线路越限潮流的控制

- 假设线路 l_{26-25} 越限功率为10MW，机组对线路的灵敏度系数及可调整功率如图红色字体。为了消除线路越限，优先选择灵敏度系数较大的进行调整。

在满足电力平衡、其它线路约束不越限的前提下，调节策略为：

- 机组37调增10MW
- 机组30调增1.25MW
- 机组38调减11.25MW



发电节点编号	有功灵敏度系数	发电节点编号	有功灵敏度系数
37	-0.6	38	+0.3
30	-0.5		
39	-0.3		
.....			

四、电力系统实时运行与控制

5、发电计划的偏差处理和评估

◆ 各机组发电计划与实际执行的电量总会产生**偏差电量**：



◆ 传统模式下

- 需要将偏差电量纳入后续的电量中予以考虑
- ✓ 实际电量进度落后的，后续多安排；
- ✓ 实际电量进度超前的，后续少安排。



◆ 现货市场模式下

- 在全电量竞价的现货市场模式下，市场化机组的实际执行电量与计划电量的偏差部分，按照实时现货市场的出清价格进行结算；
- 在分散式的市场模式下，由于中长期市场化交易电量需要尽量保证执行，因此实际执行电量与计划分解电量的偏差，纳入后续的发电计划编制中进行滚动修正。