



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 10

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

第四章 新能源电力系统稳态运行分析与计算

4.1 传统电力系统的潮流计算

4.2 风力发电和光伏发电并网的潮流计算

熟练掌握风力发电接入系统的潮流计算模型。

熟练掌握光伏发电接入系统的潮流计算模型。

4.3 含新能源电力系统的随机潮流计算

了解风力发电接入系统的随机潮流模型。

了解光伏发电接入系统的随机潮流模型。

4.4 新能源并网后电力系统的频率控制

重点掌握新能源接入后一次、二次调频方法。

4.5 新能源并网后电力系统电压及无功补偿控制

掌握新能源对系统节点电压水平的影响及无功补偿控制。

4.4 新能源并网后电力系统的负荷频率控制

- 重要性

- 风电和光伏出力的持续性波动，对电力系统来说，就相当于**负的负荷波动**，因此，需要校验其功率扰动是否对系统的**稳态频率**及**动态频率控制**带来影响。
- 频率是交流电力系统电能质量的一个重要指标。在**稳态运行**情况下，全系统各点的频率都相等，所有发电机都保持同步运行。
- **电能质量**还包括？？

一、电力系统频率的基本概念

- 1. 发电机的转速和频率之间的关系：

$$n = 60f / p$$

为了保持系统的频率在额定值附近，需要不断调整原动机的输入功率，使发电机的输出有功功率与系统有功功率变化相适应，从而使发电机的稳态转速变化不致过大。

频率变化对电力系统的影响

➤ 对用户侧的影响

- ❖ 异步电动机的空载转速
- ❖ 恒转矩负荷的电动机功率
- ❖ 电子设备的计时

➤ 对供电侧的影响

- ❖ 电厂锅炉与水泵、风机
- ❖ 汽轮机的额定转速与共振
- ❖ 变压器的励磁电流增加

• 2. 负荷的有功功率及其频率特性

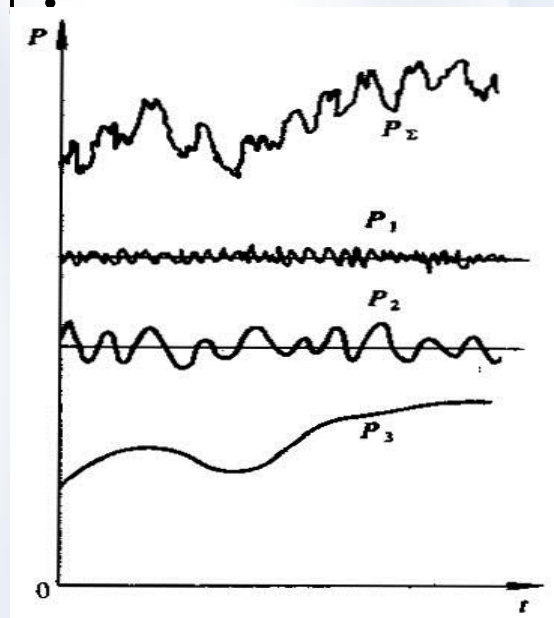
— 负荷随时间变化的曲线称为**负荷曲线**，一天内的负荷曲线即为**日负荷曲线**，相对应的还有**月负荷曲线**、**年负荷曲线**等。

— 负荷按照波动周期可分为三种：

• 第一种**变动幅度很小，周期又很短**，这种负荷变动有很大的偶然性。

• 第二种**变动幅度较大，周期也较长**，属于这一种的主要有电炉、压延机械、电气机车等带有冲击性的负荷。

• 第三种**变动幅度最大，周期也最长**，这一种是由于生产、生活、气象等变化引起的负荷变动。



有功功率负荷的波动曲线

- 有功负荷的变化及其调整

- 第一种负荷变化

- 由**调速器**调整：频率的一次调整

- 第二种负荷变化

- 由**调频器**调整：频率的二次调整

- 第三种负荷变化

- 电力系统的**经济运行调整 (经济调度)**

- 实际系统的负荷是几类负荷的组合，**负荷所吸收有功功率和频率之间的关系**可以表示为频率的多项式：

$$P_L = a_0 P_{LN} + a_1 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right) + a_2 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 + a_3 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^3 + L$$

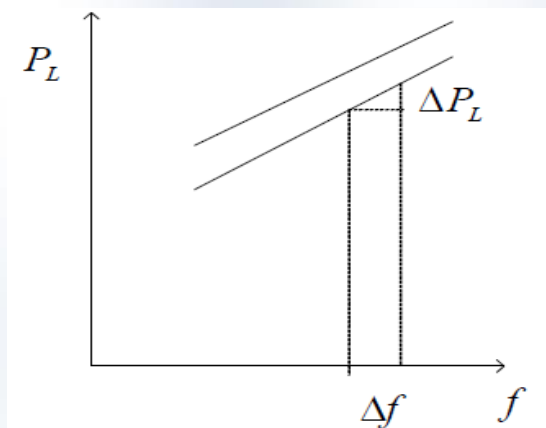
$$a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + \cdots = 1$$

- 由于系统在正常稳态情况下的频率与额定频率之间偏差通常很小（**不超过 $\pm 0.1\text{Hz} \sim 0.2\text{Hz}$** ），而且频率高次项所占比重很小，因此**可只考虑常数项和一次项**，若取 P_{LN} 和 f_N 作为 P_L 和 f 的基准值，可得：

$$\Delta P_L = K_L \Delta f$$

$$\Delta P_{L*} = K_{L*} \Delta f_*$$

$$K_{L*} = K_L f_N / P_{LN}$$



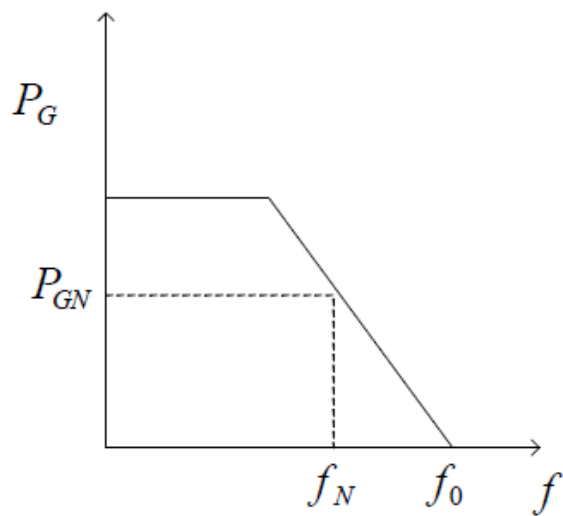
负荷的静态频率特性

• 3. 发电机组有功功率及其频率特性

在自动调速系统下，发电机输出的有功功率与频率之间的稳态关系称为**机组的有功功率静态频率特性**，简称为机组的频率特性。稳态下发电机发出有功功率和频率之间的关系是：

$$P_G = P_{GN} + K_G(f_N - f)$$

- 发电机频率特性的斜率为 K_G ，称为**发电机的单位调节功率**，以 MW/Hz 为单位；
- 电力系统也常用**调差系数 $\sigma\%$** 来反映其静态特性。



发电机组的频率特性

$$K_G = -\Delta P_G / \Delta f$$

$$K_{G^*} = -\frac{\Delta P_G f_N}{P_{GN} \Delta f} = K_G f_N / P_{GN}$$

$$\sigma\% = \frac{1}{K_{G^*}} \times 100 = -\frac{P_{GN} \Delta f}{\Delta P_G f_N} \times 100 = \frac{f_N - f_0}{f_N} \times 100$$

二、电力系统频率调整回顾

- 1.一次调频

◆频率的一次调整，是指当外界负荷变化引起电网频率改变时，网内各运行机组的调节系统将根据各自的静态频率特性改变机组的功率，以适应外界负荷变化的需要，这种由调节系统自动调节功率，以减小电网频率变化幅度的方法。

◆一次调频属于：有差调节。

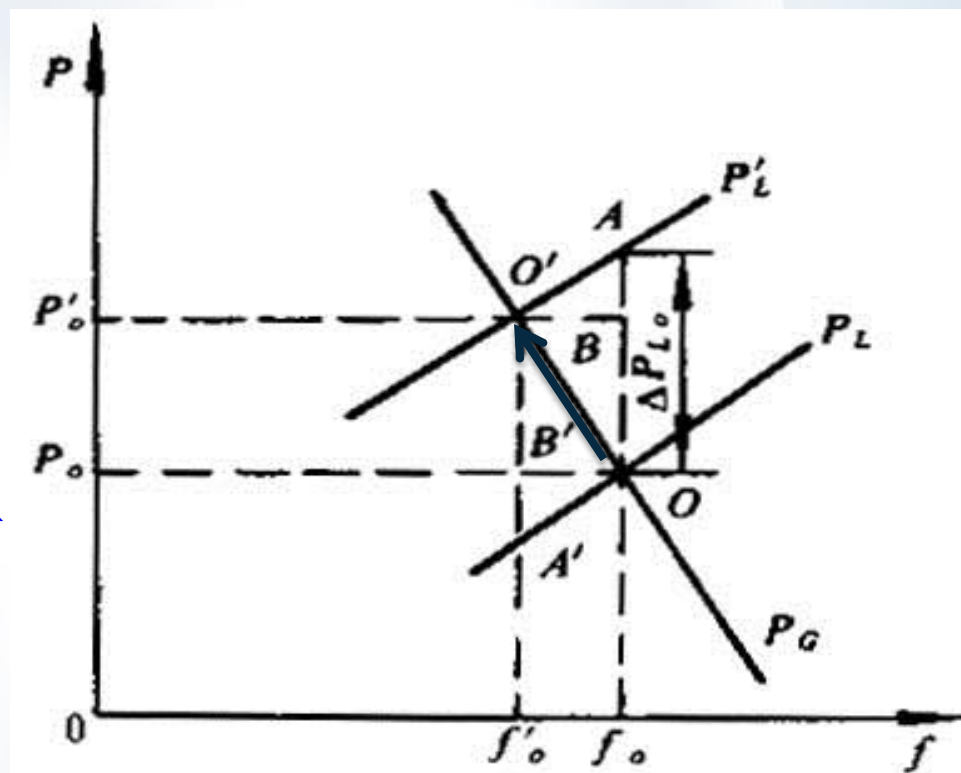
- 负荷功率从 P_L 增至 P_L' 曲线
- 运行点从O点至O'点

$$\begin{cases} \Delta P_{L0} + \Delta P_L = \Delta P_G \\ \Delta P_G = -K_G \Delta f \\ \Delta P_L = K_L \Delta f \end{cases}$$

$$\Delta P_{L0} = -(K_G + K_L) \Delta f$$

- 系统的功率频率静态特性系数，或单位调节功率，单位为MW/Hz：

$$K_S = K_G + K_L = -\Delta P_{L0} / \Delta f$$



电力系统的功率频率静态特性

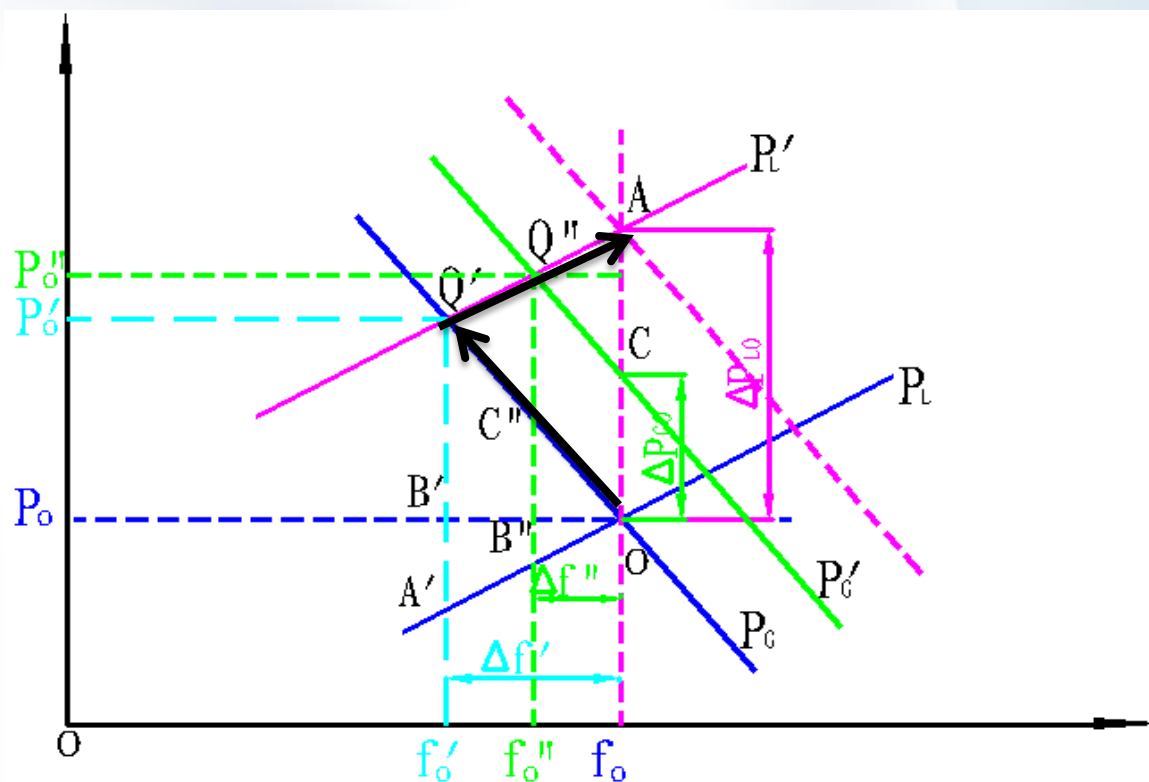
二、电力系统频率调整回顾

- 2.二次调频，也称为**负荷频率控制**（Load Frequency Control, LFC）
 - 频率的二次调整，是指手动或自动地操作调频器使发电机的频率特性平行地上下移动，从而使负荷变动引起的频率偏移可保持在允许范围内。需要发电机组提供足够的可调整容量及一定的调整速率，在允许的调节偏差下实时跟踪频率，以满足系统频率的要求。
 - **二次调频**是通过增加原动机出力，切实地增加供出的有功功率以满足负荷的增量。因此可以做到**无差调节**。

- 负荷功率从 P_L 增至 P_L' 曲线，调频发电机从 P_G 增至 P_G' 曲线
- 运行点从O点至Q'点和Q''点，再运行至A点

发电机组多发的有功功率为：

$$\Delta P_{G0} = \Delta P_{L0} + (K_G + K_L)\Delta f = \Delta P_{L0}$$



二次调频示意图

二、电力系统频率调整回顾

- 3.经济调度（Economic Dispatch, ED）

—含义：

- 经济调度的目的是在满足电力系统频率质量和系统安全的前提下，合理利用能源和设备，以最低的发电成本或费用，获得更多的、优质的电能。

- 经典经济调度是指系统的发电容量大于负荷需求时，系统中参加运行的机组已经预先确定的情况下，将负荷优化分配给各发电机组，达到全系统的燃料消耗量或发电费用最小。
- 经济调度的发展历经了三个阶段
 - 基本负荷法
 - 最优负荷点法
 - 等微增率法
- 目前总发电费用最小的优化，以等微增率法为基本方法，但发展极为迅速；
- 当前全世界范围内ED方面的理论与方法是电力系统最活跃的领域之一。

二、电力系统频率调整回顾

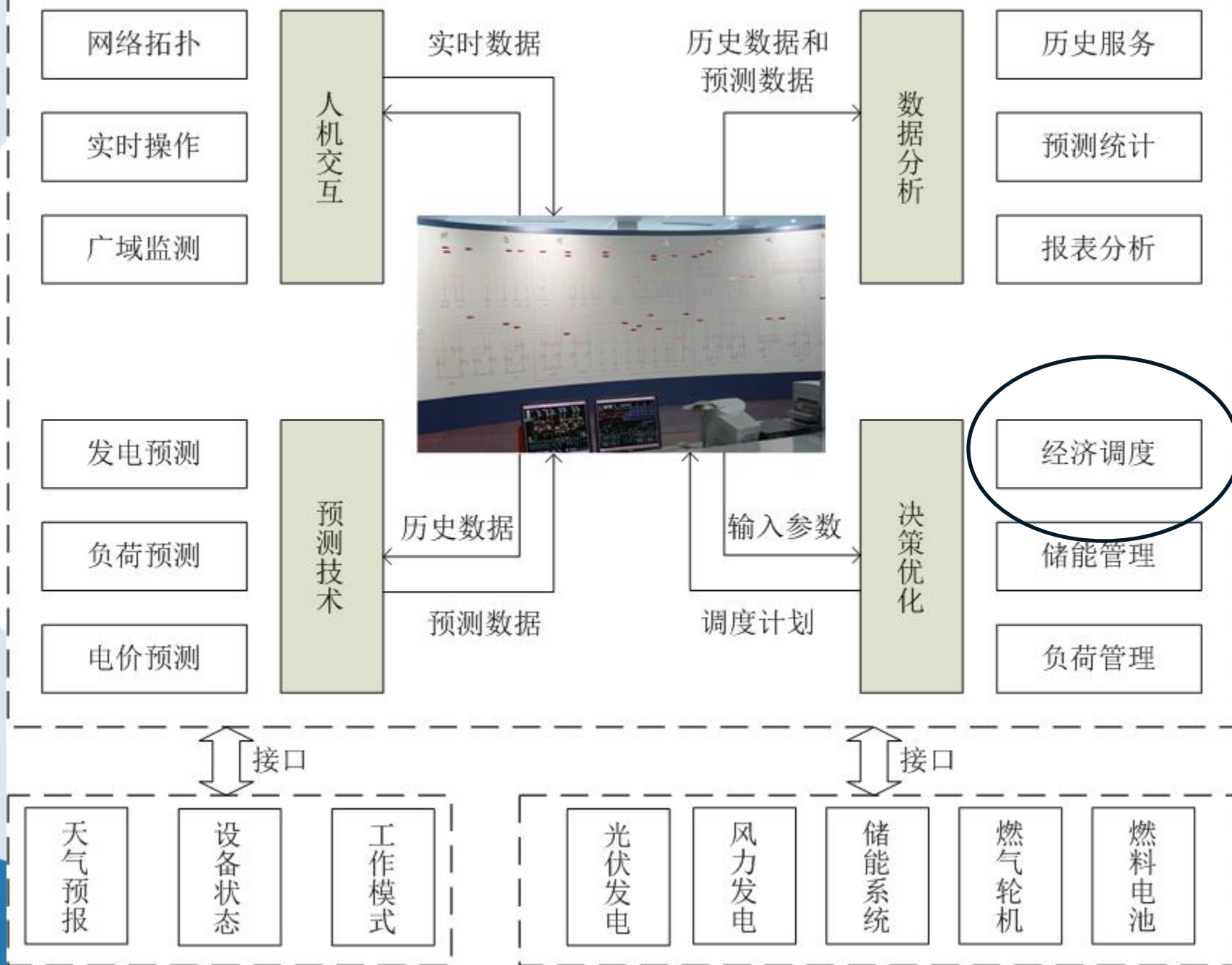
- 4. 三级频率控制之间是互补、相辅相成的关系：
 - 一次调频，是负荷、发电机对电网频率变化作出的自动响应，针对变化周期短、变化幅度小的负荷分量（秒级）；
 - 二次调频，电网调度中心通过远动通道对发电机的有功出力进行控制，从而快速恢复频率偏移，针对变化周期较长、幅度较大的负荷分量（分钟级）；
 - 三级控制，包括备用管理、调峰、经济调度，通过优化方法对发电厂有功进行经济分配，针对变化缓慢、变化幅度大的负荷分量。

二、电力系统频率调整回顾

- 5. 二次调频LFC和经济调度控制EDC，统称为**自动发电控制**（Automatic Generation Control, AGC）
 - 自动发电控制AGC：是能量管理系统（Energy Management System, EMS）中的一项重要功能，它控制着调频机组的出力，以满足不断变化的用户电力需求，并使系统处于经济的运行状态。

- AGC以区域系统为单位，各自对本区内的发电机的出力进行控制，主要任务如下：
 - (1) **维持系统频率为额定值**，在正常稳态运行工况下，其允许频率偏差在正负（0.05~0.2）Hz之间，视系统容量大小而定。
 - (2) 控制本地区与其他**区间联络线上的交换功率为协议规定的数值**。
 - (3) 在满足系统安全性约束条件下，对发电量**实行经济调度控制EDC**（Economic Dispatch Control）。

含新能源电力系统能量管理系统EMS



电力系统有功功率的经济分配

◆ 经济分配的**目标函数**和**约束条件**

➤ 1) 目标：**燃料消耗 F 最小**

$$\min_i F = \sum_{i=1}^n F_i(P_{G_i})$$

➤ 2) 等式约束条件：**有功功率平衡**

✓ 考虑网损

$$\sum_{i=1}^n P_G = \sum_{j=1}^m P_{LDj} + P_{Loss}$$

✓ 忽略网损

$$\sum_{i=1}^n P_G = \sum_{j=1}^m P_{LDj}$$

- 3) 不等式约束条件:
 - 机组的有功功率上、下限
 - 机组的无功功率上、下限
 - 节点电压幅值的上、下限

$$\begin{cases} P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \\ Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \\ U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \end{cases}$$

电力系统有功功率的经济分配



- 多个发电厂间的负荷经济分配
 - 忽略网损时的有功负荷经济分配
 - 等耗量微增率准则

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_{G_i}} = \lambda$$

- 如果任两台机组不按等耗量增率原则会怎样？
- 设G1多发 ΔP ，G2少发 ΔP ，燃料消耗成本一定增加。

$$\frac{dF_1}{dP_{G1}} > \frac{dF_2}{dP_{G2}} \quad \longrightarrow \quad \Delta F = \frac{dF_1}{dP_{G1}} \Delta P - \frac{dF_2}{dP_{G2}} \Delta P > 0$$

电力系统有功功率的经济分配

—考虑网损时的有功负荷经济分配

- 经过网损修正后的等耗量微增率准则:
(负荷经济分配的协调方程式)

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_{G_i}} \times \left(\frac{1}{1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{G_i}}} \right) = \lambda$$

思考题：

- 从三级频率控制的角度，分析电力系统中各台发电机发出的有功功率如何确定的？



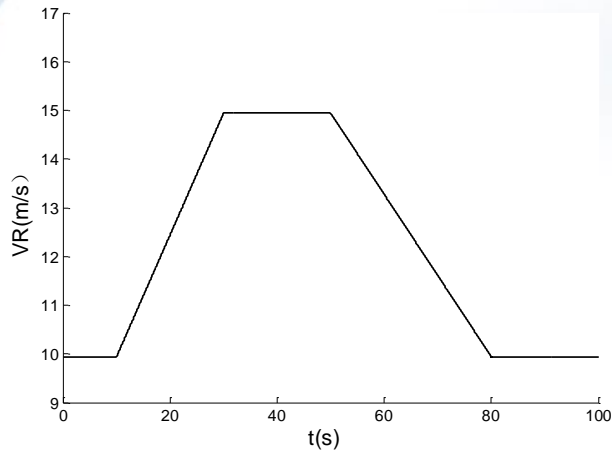
三、新能源对电力系统频率的影响

1. 风电接入对系统调频的影响

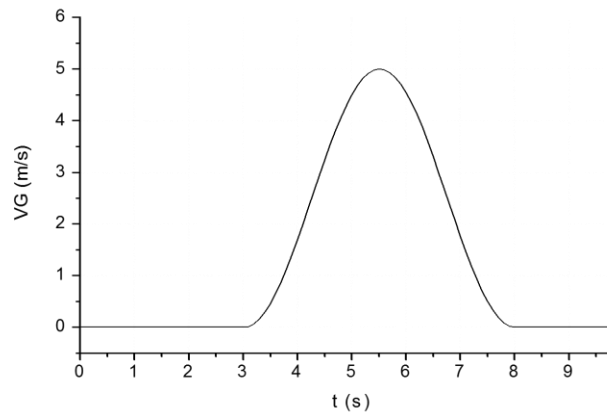
(1) 不同波动幅度的风速模型对电力系统频率的影响（对应风电功率的波动幅度）

- 风力发电对电力系统频率的影响主要是由风速变化引起的风电机组的频繁启停、以及风功率的随机波动造成的，因此风功率波动对电网频率的影响是分析风电并网对电力系统频率影响的基础和前提。

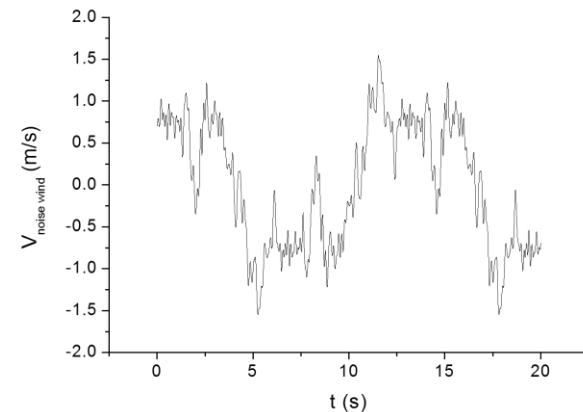
三种不同风速的数学模型及曲线



渐变风扰动曲线



阵风扰动曲线



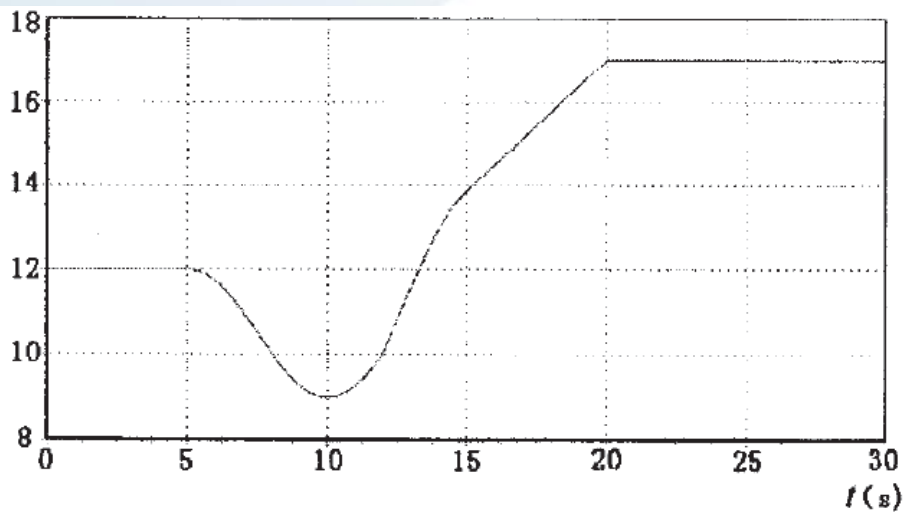
随机风扰动曲线

$$V_R = \begin{cases} 0 & t < T_s \\ V_{ramp} & T_s \leq t < T_s + T_1 \\ V_{Rmax} & T_s + T_1 \leq t < T_e - T_2 \\ V'_{ramp} & T_e - T_2 \leq t \leq T_e \\ 0 & t > T_e \end{cases}$$

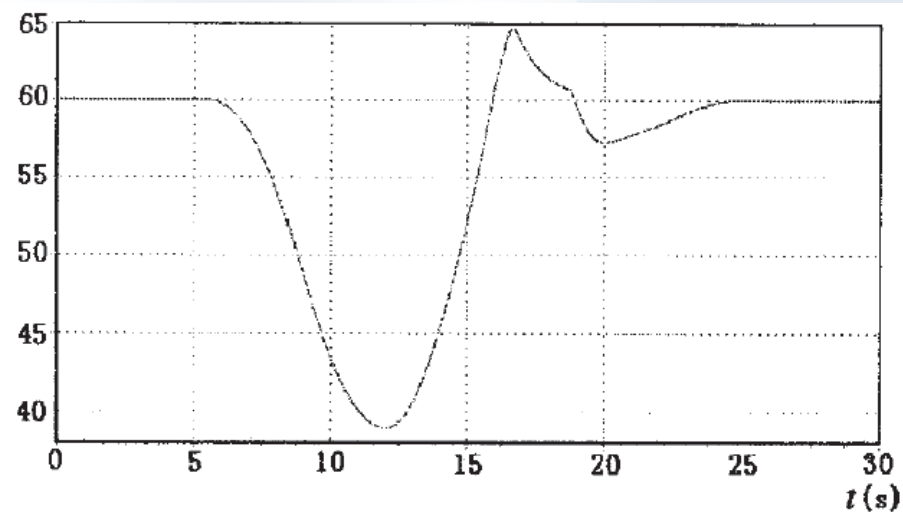
$$V_G = \begin{cases} 0 & t < T_s \\ \frac{V_{Gmax}}{2} [1 - \cos(2\pi \frac{t}{T_e - T_s} - \frac{T_s}{T_e - T_s})] & T_s \leq t < T_e \\ 0 & t > T_e \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & t < T_{1G} \\ & T_{1G} \leq t \leq T_{2G} \\ & t > T_{2G} \end{aligned}$$

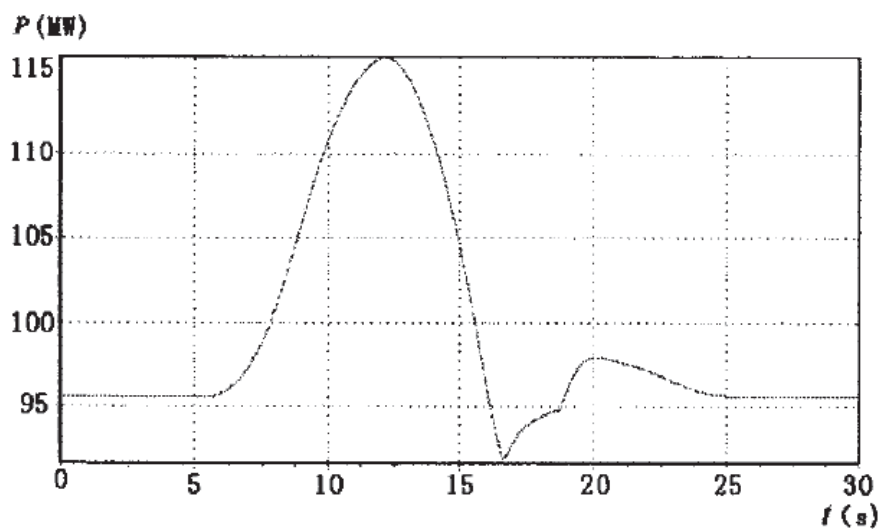
$$V_{WN} = 2 \sum_{i=1}^N [S_V(\omega_i) \Delta \omega]^{1/2} \cos(\omega_i t + \phi_i)$$



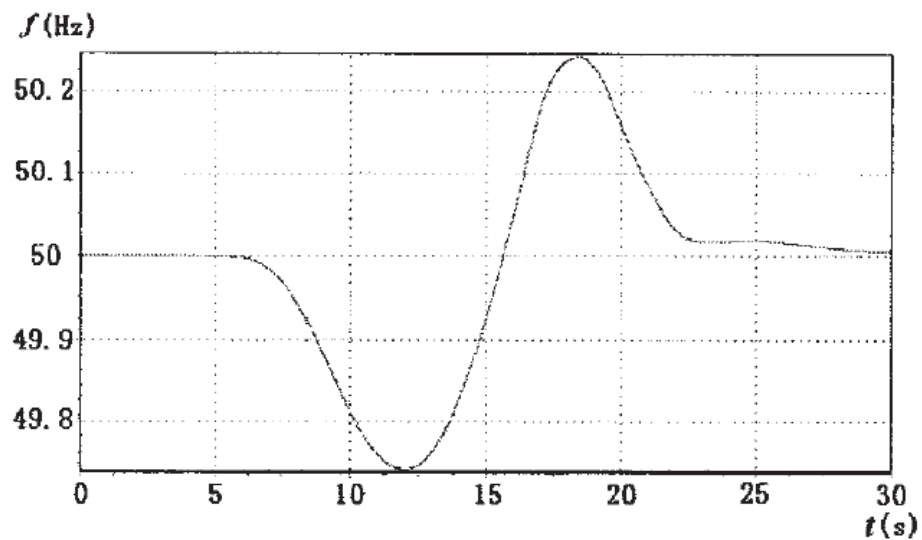
a) 风速曲线



b) 风电场有功功率曲线



c) 同步发电机有功功率曲线



d) 系统频率曲线

(2) 不同风电机组类型对电力系统频率的影响

- 1) 恒速恒频风电机组

- 其风机直接接入电网，转子转速与系统频率有很强的耦合关系，系统负荷增加造成频率下降时，引起发电机电磁转矩增加，电磁功率也就随之增加，假定风速恒定，则风力机转速恒定不变，输出机械功率不变，从而导致电磁功率与机械功率的不平衡(电磁功率大于机械功率)，发电机转速下降，释放储存在转子中的动能。
- 鼠笼感应电机的转差率通常为1~6%，感应电机的定子和电网直接连接，使得电网频率和发电机电磁转矩、有功功率之间存在很强的耦合，通常惯性常数为2~6s，因此能够对频率的变化产生快速的反应。

(2) 不同风电机组类型对系统频率的影响

- 2) 基于双馈感应发电的变速恒频风电机组
 - 现行的控制方式下，定子直接接入电网，转子通过换流器间接接入电网，这种特有的控制方式使得其电磁转矩调节非常快，机械功率与系统电磁功率解耦、转速与电网频率解耦，无法对系统频率变化做出自动的响应。
 - 因此，当系统频率变化时，换流器通常控制电磁功率保持不变，由于风速恒定，风力机转速不变，输出机械功率不变，从而电磁功率与机械功率能够保持平衡，发电机转速不变，无法释放转子中的动能。即：双馈风电机组并网使得整个系统的转动惯量减小，从而不利于电网频率的恢复。

(2) 不同风电机组类型对系统频率的影响

- 3) 基于永磁直驱同步发电的变速恒频风电机组
 - 多极同步发电机，电机的定子通过一个AC/DC/AC 换流器连接到电网，导致当电力系统的频率发生改变时，定子不受电网频率变化的影响。当电网频率变化时，同样没有惯性反应。
- 因此，在DFIG和PMSG大规模并网情况下，需提供辅助的频率调整设备以确保系统频率在规定的范围之内。

(3) 风电机组无功控制方式对电力系统频率的影响

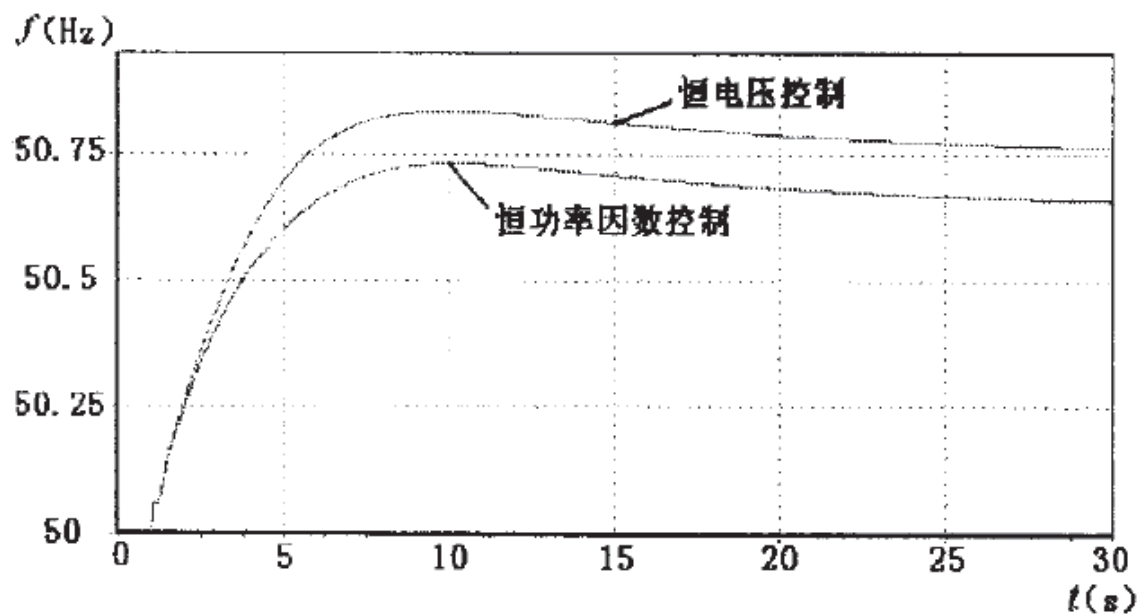
- 例如双馈感应风电机组，当采用定子电压矢量控制，实现有功功率与无功功率控制上的解耦，即通过改变转子电流的幅值和相位就能够改变发电机输出的有功和无功功率，从而使得双馈风电机组可以部分参与系统的频率动态响应。
- 通常，双馈风电机组有两种主要无功控制方式：
 - 恒电压控制
 - 恒功率因数控制

— 风电机组不同无功控制方式下系统频率的变化对比算例

- 双馈风电机组采用恒电压控制时，系统最大频率偏移为0.85Hz；

- 采用恒功率因数控制时最大频率偏移只有0.75Hz，且采用恒功率因数控制方式运行，电力系统频率变化较缓；

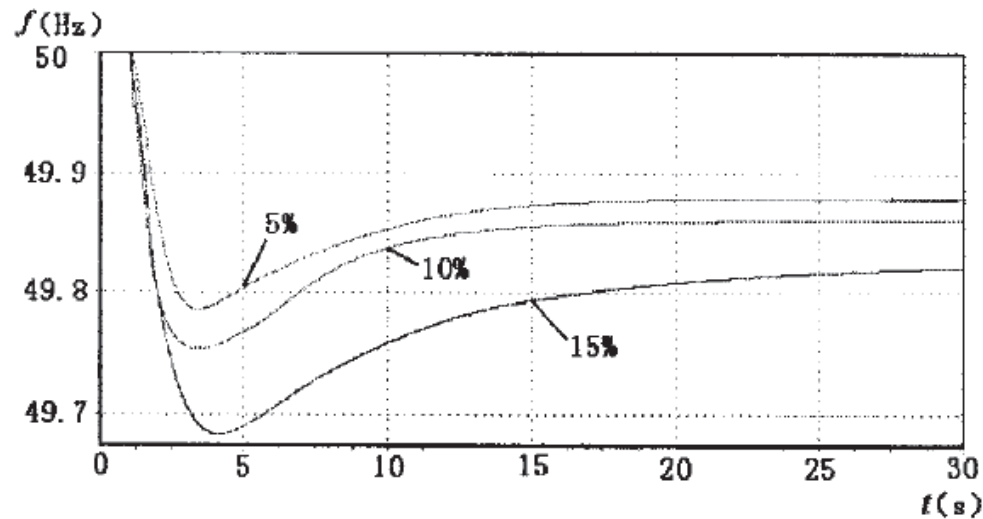
- 双馈风电机组采用恒功率因数控制方式更有利于保证电力系统的频率质量。



不同无功控制方式下电力系统频率曲线

(4) 风电渗透率对电力系统频率的影响

- 风电渗透率（Wind Power Penetration Level）通常指的是风电装机容量占系统总负荷的比例。
 - 目前，风电场规模越来越大，风电装机容量占系统的比例即风电渗透率也越来越高，其接入系统对电网的影响范围加大，加剧了电网的频率控制问题。
 - 这是由于风电机组替代了部分原有的常规发电机组，常规发电机惯量减少，比如双馈风电机组对系统惯量几乎没有贡献，从而系统总惯量也相应减少，自动调频能力降低，对于同样的负荷波动，风电渗透率越高，对电力系统频率的负面影响越大。



不同风电渗透率下电力系统频率曲线

- 当风电渗透率较低(5%)时，对系统频率稳定的影响相对较小，起始频率下降速率及最大频率偏移都较小(0.2Hz)，
- 随着风电渗透率的不断提高(达10%、15%)，起始频率下降速率越来越快，最大频率偏移也越来越大(分别为0.24Hz、0.32Hz)，不利于电网频率的恢复。

2. 含新能源电力系统负荷频率控制方法

- 风电机组的有功-频率运行的特点

- 通常双馈风电机组通常是不参与调频的，它采用矢量控制方式使其转速与电网频率解耦，无法对电网频率变化做出快速响应，而只能依靠常规机组调频，**双馈风电机组对系统惯量没有直接贡献**，大规模风电并网将增加常规同步发电机的调频压力。
- 但是，风电机组自身的调节特性使得**它具有比常规机组更快的响应能力**，因此相关电网准则已明确提出要求风电有一定的调频能力，在其允许范围内适当参与系统调频，以利于电网的正常运行。

- 新能源风力发电参与调频的可能方法

- ◆ 频率偏高

- 1) 频率过高时，可以通过关掉风电场的部分风力机、或通过桨距控制来少发有功功率；
 - 2) 如爱尔兰国家电网公司就要求，风电场需具备3%~5%的调频能力（与火电厂要求相同）。

- 新能源风力发电参与调频的可能方法

- ◆ 频率偏低

- 1) 基于双馈发电机的风机系统，通过增加一个辅助的控制环节，当系统频率变化时能够释放能量。
 - 2) 利用永磁同步发电机参与一次调频，通过模糊控制理论在任何运行点能够获得一次能量保留。
 - 3) 对于所有变速风力发电机，可以利用其桨叶或电机惯性的旋转能量参与一次调频。但需注意，释放和储存的能量只能作为一次调频的一部分，事实上由于风能的不连续性，短时间内这种能量很难长期保存，有待进一步的深入研究。

(1) 惯性控制

- ◆简单地在风电机组中增加一个**频率调节模块**;
- ◆完整的惯性控制模型主要包括四个模块:
 - ◆频率调节模块
 - ◆转速保护模块
 - ◆转速恢复模块
 - ◆功率协调模块

(1) 惯性控制

在风力发电机有功功率控制中增加比例控制回路，并添加一阶滤波环节，以减少对机械传动链的影响，减小功率变化率。当系统频率变化时，此频率调节模块额外提供的功率参考值为：

$$\Delta P_{wi} = -K_{wi} \Delta f$$

当电力系统频率偏高需要下降时，通过惯性控制降低转子转速，释放转子中储存的动能，使得双馈风电机组参与系统频率调节。假设转子转速从 ω_1 变至 ω_0 ，则可释放的动能为：

$$\Delta E = \frac{1}{2} J \omega_1^2 - \frac{1}{2} J \omega_0^2$$

(2) 基于分段控制思想的有功-频率控制策略

- 惯性控制只能是一种临时性的调频控制方法；
- 惯性控制只能使风电机组在电力系统频率需要下降时参与调频，而不能够在系统频率需要上升时起到调节作用。
- 为使双馈风电机组能够发挥类似常规调频机组的作用，自动检测系统频率偏移，调整出力变化，不仅能够在系统频率上升时减小出力，也能够系统在频率下降时增发有功，需要在风电机组的有功功率控制中增加部分辅助控制，并使风电机组初始运行于最大功率以下，即处于卸载运行状态。

— 考虑风电的经济性，风电机组并不适合也没有必要始终参与调频，仅需限制极端情况下的负荷波动，其各个运行阶段如图所示：

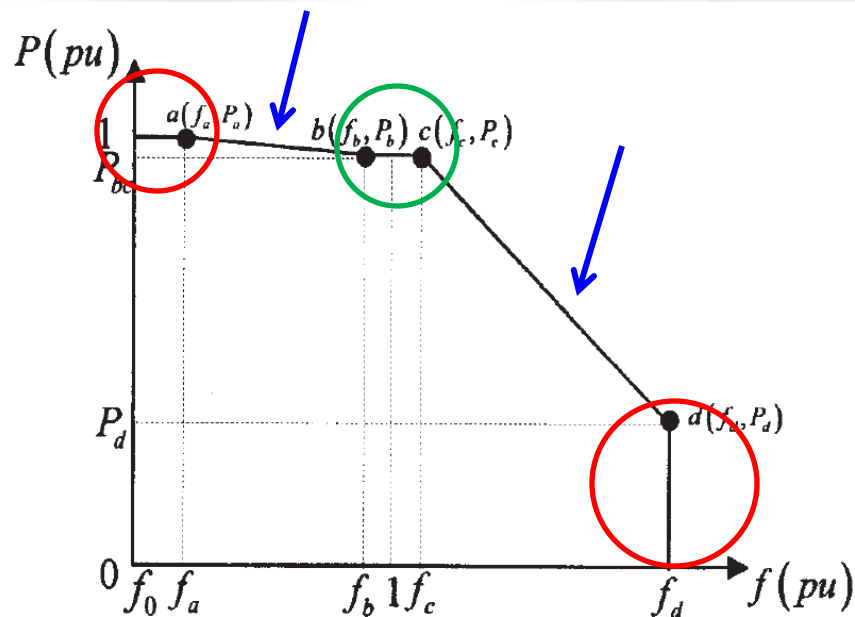
(1) **最大功率运行段**。此时系统频率过低($f < f_a$)，风电机组维持最大功率跟踪状态，以提供足够的有功支撑；

(2) **调频段**。它包括对系统频率下降(ab段)及上升(cd段)的调节两段，此时系统频率超出设定的限值，风电机组调整出力，响应系统频率变化，具体见右式；

(3) **卸载运行段(bc段)**。此时系统频率在设定的限值以内($f_b < f < f_c$)，风电机组不参与调频，始终在最大功率以下的某值运行；

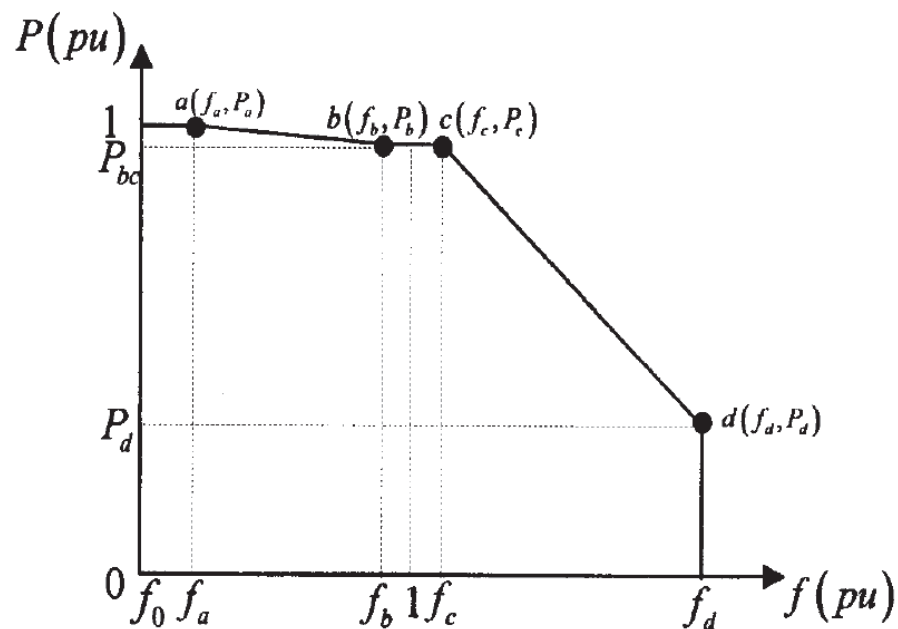
(4) **脱网运行段**。此时系统频率过高($f_d < f$)，风电机组不再参与调频，脱网退出运行。

$$\Delta P = \begin{cases} \frac{1 - P_{bc}}{f_a - f_b} \Delta f & f_a < f < f_b \\ \frac{P_{bc} - P_d}{f_c - f_d} \Delta f & f_c < f < f_d \end{cases}$$



基于分段控制思想的双馈风电机组有功-频率控制策略下，风电机组的有功功率参考值(单位：p.u.)为：

$$P_{set} = \begin{cases} 1 & f < f_a \\ P_{bc} + \Delta P & f_a < f < f_b, f_c < f < f_d \\ P_{bc} & f_b < f < f_c \\ 0 & f > f_d \end{cases}$$



风电机组有功-频率响应曲线

风电参与微电网调频控制模型示例



柴油机



交流负荷

交流母线



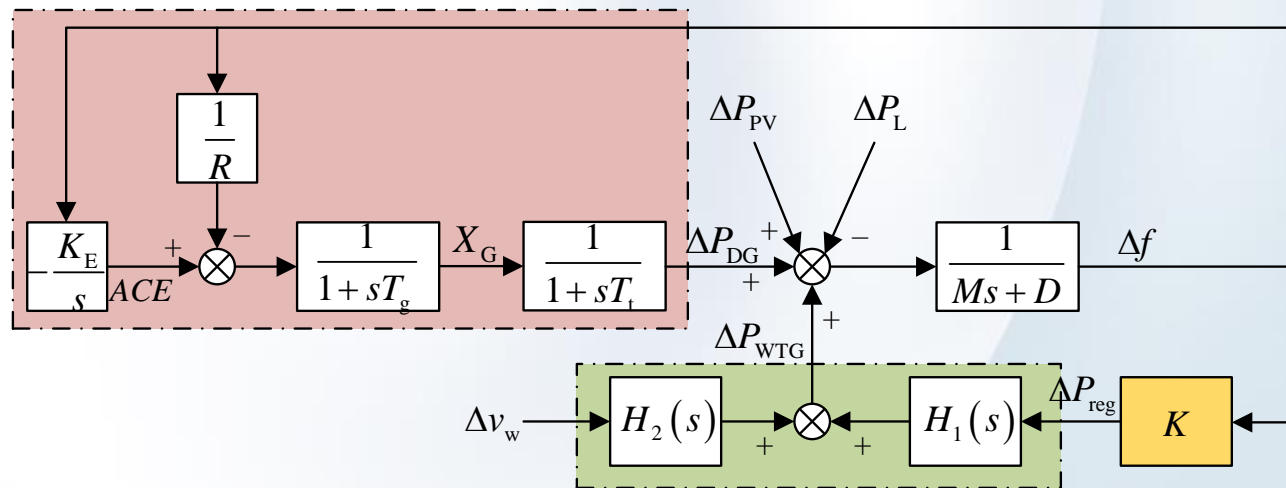
风力发电



光伏发电

Δf 表示系统的频率偏差; ΔP_{DG} 为柴油机发出功率的变化量; X_G 为调速器输出; ACE 为ACE控制输出; ΔP_{PV} 为风电功率波动; ΔP_L 为负荷功率波动; Δv_w 为风速波动; ΔP_{reg} 为风电机组有功功率的参考值。 ΔP_{WTG} 为风电机组发出功率。

所分析孤岛微电网包含风力发电、光伏发电、柴油机和负载，风速波动、光伏发电功率波动、负载功率波动为外界扰动，系统的惯性常数和阻尼系数为其中的不确定性变量



模型建立

过速减载

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A v_{wind}^3$$

$$P_e = K_{wf} K_{wopt} \omega_r^3 + P_{reg}$$

$$P_m - P_e = 2H_{DFIG} \omega_r d\omega_r / dt$$

线性化

$$\Delta P_m = A_1 \cdot \Delta\beta + A_2 \cdot \Delta\omega_r + A_3 \cdot \Delta v_w$$

$$A_1 = \partial \Delta P_m / \partial \Delta\beta = 0.5 \rho A_r V_{w0}^3 \partial \Delta C_p / \partial \Delta\beta$$

$$A_2 = \partial \Delta P_m / \partial \Delta\omega_r = 0.5 \rho A_r V_{w0}^3 (\partial \Delta C_p / \partial \Delta\lambda) \times (\partial \Delta\lambda / \partial \Delta\omega_r)$$

$$A_3 = \frac{\partial \Delta P_m}{\partial \Delta v_w} = 0.5 \rho A_r \times \left(3C_p V_{w0}^2 + V_{w0}^3 \frac{\partial \Delta C_p}{\partial \Delta\lambda} \cdot \frac{\partial \Delta\lambda}{\partial \Delta v_w} \right)$$

$$\Delta P_e = K_{wf} K_{wopt} \omega_r^2 \Delta\omega_r + \Delta P_{reg}$$

$$\Delta P_m - \Delta P_e = 2H_t \omega_r d\Delta\omega_r / dt$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{A_2 - 3K_{del} \omega^2}{2H_t \omega} \Delta\omega + \frac{A_3}{2H_t \omega} \Delta v - \frac{1}{2H_t \omega} \Delta P_{reg}$$

$$\Delta P_{WTG} = 3K_{del} \omega^2 \Delta\omega + \Delta P_{reg}$$

调节桨距角减载

$$\frac{d\beta_1}{dt} = \omega - \omega_{ref}$$

$$K_I \beta_1 + K_p (\omega - \omega_{ref}) = T_s \frac{d\beta}{dt} + \beta$$

$$\Delta P_m = A_1 \cdot \Delta\beta + A_2 \cdot \Delta\omega_r + A_3 \cdot \Delta v_w$$

$$\Delta P_e = K_{wf} K_{wopt} \omega_r^2 \Delta\omega_r + \Delta P_{reg}$$

$$\Delta P_m - \Delta P_e = 2H_t \omega_r d\Delta\omega_r / dt$$

$$\frac{d\Delta\beta_1}{dt} = \Delta\omega$$

$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = \frac{K_p}{T_s} \Delta\omega + \frac{K_I}{T_s} \Delta\beta_1 - \frac{1}{T_s} \Delta\beta$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{A_2 - 3K_{del} \omega^2}{2H_t \omega} \Delta\omega + \frac{A_1}{2H_t \omega} \Delta\beta + \frac{A_3}{2H_t \omega} \Delta v - \frac{1}{2H_t \omega} \Delta P_{reg}$$

$$\frac{d\Delta\beta_1}{dt} = \Delta\omega$$

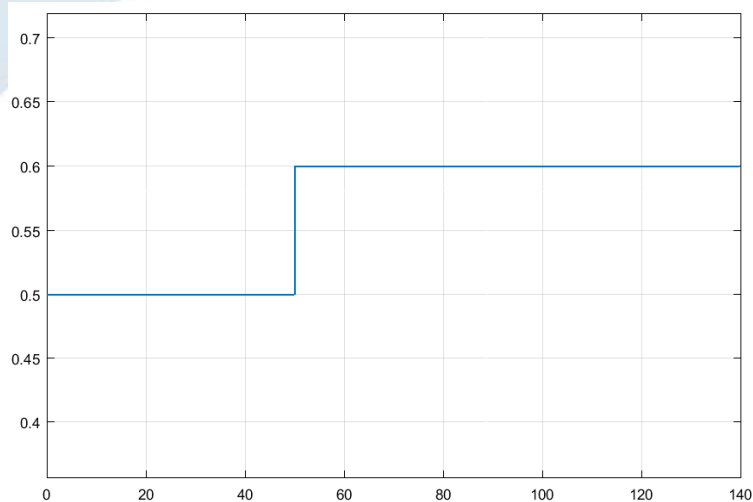
$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = \frac{K_p}{T_s} \Delta\omega + \frac{K_I}{T_s} \Delta\beta_1 - \frac{1}{T_s} \Delta\beta$$

$$\Delta P_{WTG} = 3K_{del} \omega^2 \Delta\omega + \Delta P_{reg}$$

仿真与分析



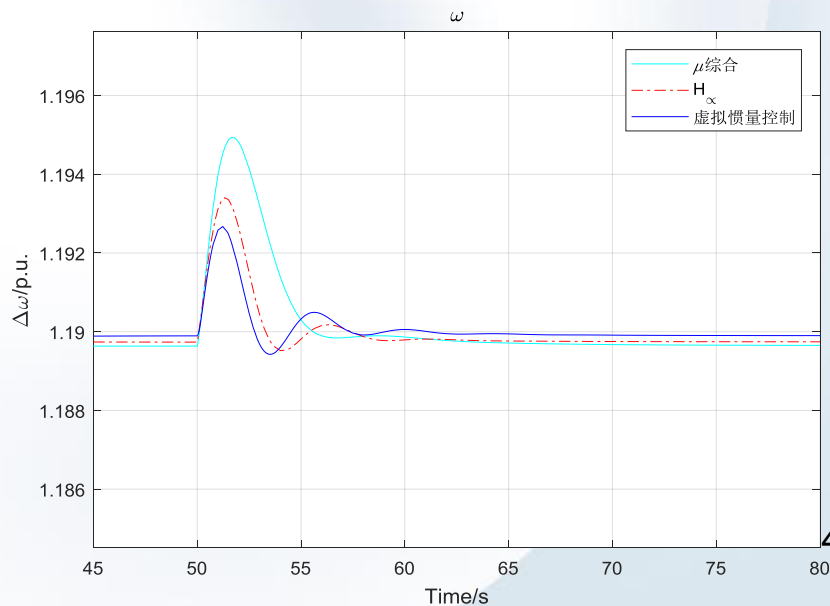
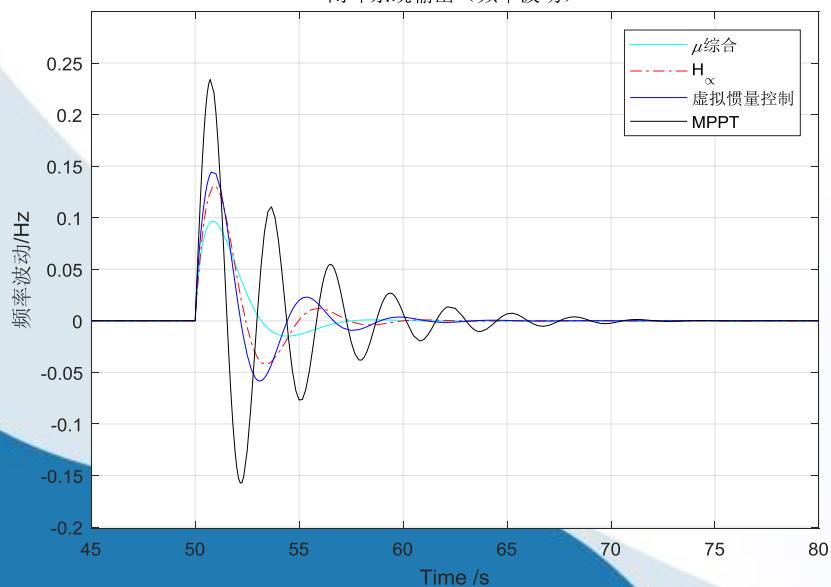
仿真场景1



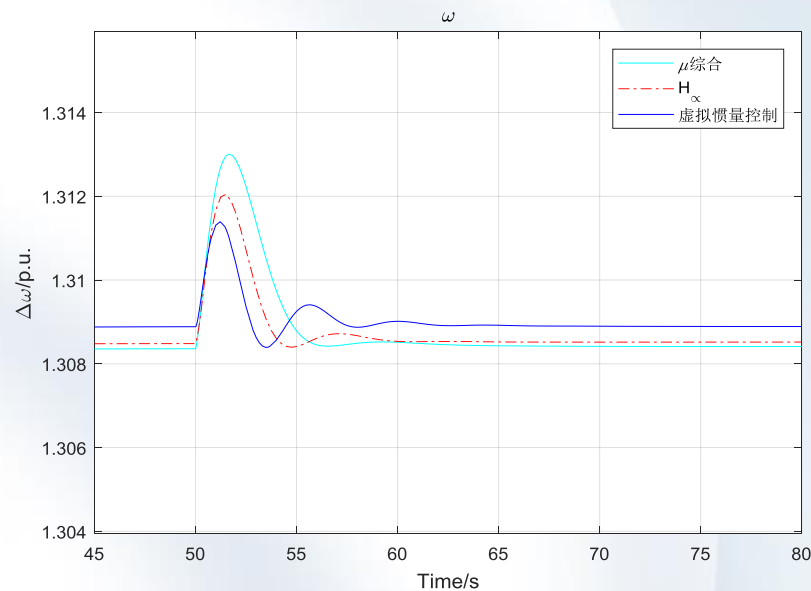
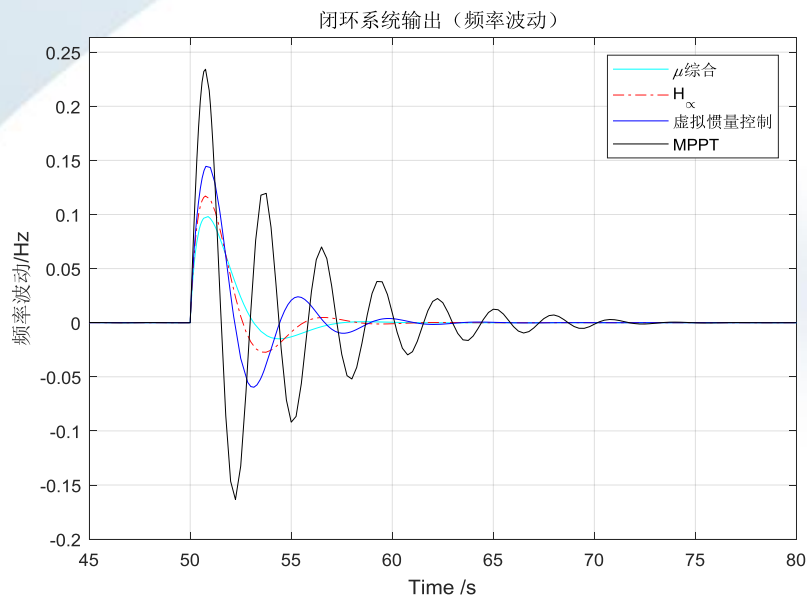
仿真场景：风速为12m/s(1p.u.)，50s时光伏功率增大0.1(p.u.)，

此时风机采用过速减载，桨距角控制系统未启动，可以看出风机参与调频会提升频率动态性能，所提出的 μ 综合鲁棒控制器相比改进的虚拟惯量控制器和 H_∞ 控制器具有更加优良的动态性能。

闭环系统输出（频率波动）

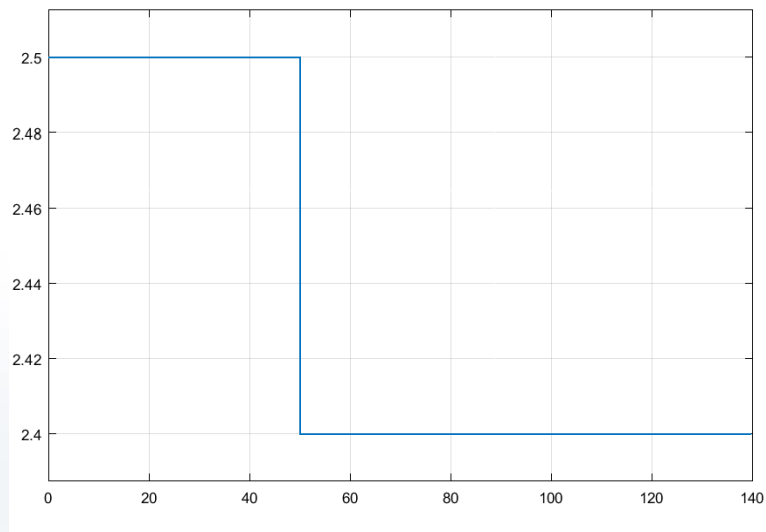


仿真场景2



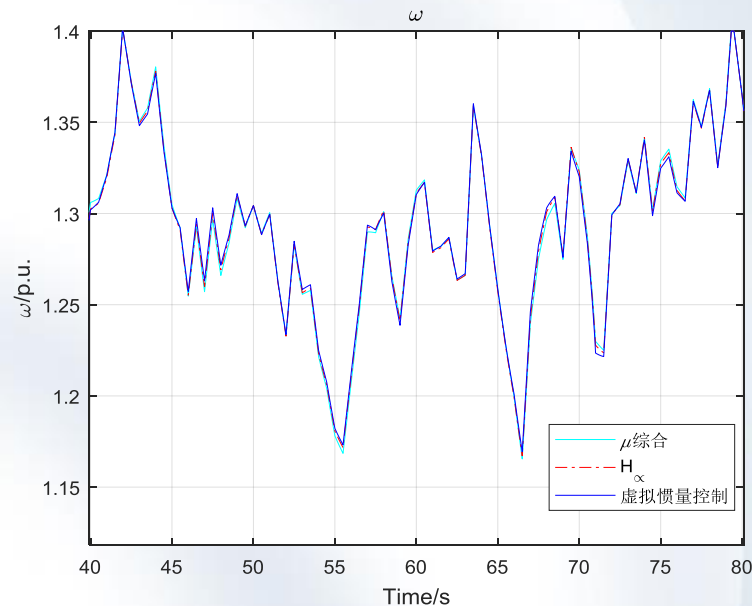
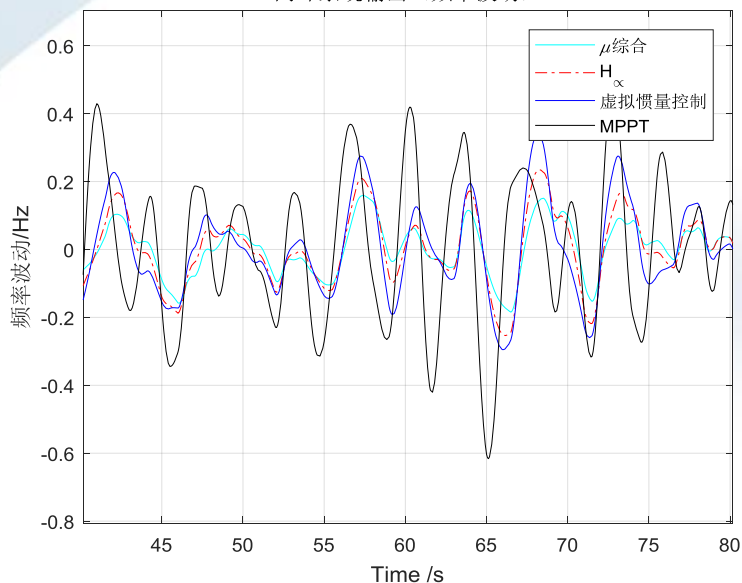
仿真场景：风速为13.2m/s(1.1p.u.) 50s时负载功率减小0.1(p.u.)

此时风机采用过速减载，桨距角控制系统已启动，所提出的 μ 综合鲁棒控制器相比改进的虚拟惯量控制器和 H_{∞} 控制器具有更加优良的动态性能。



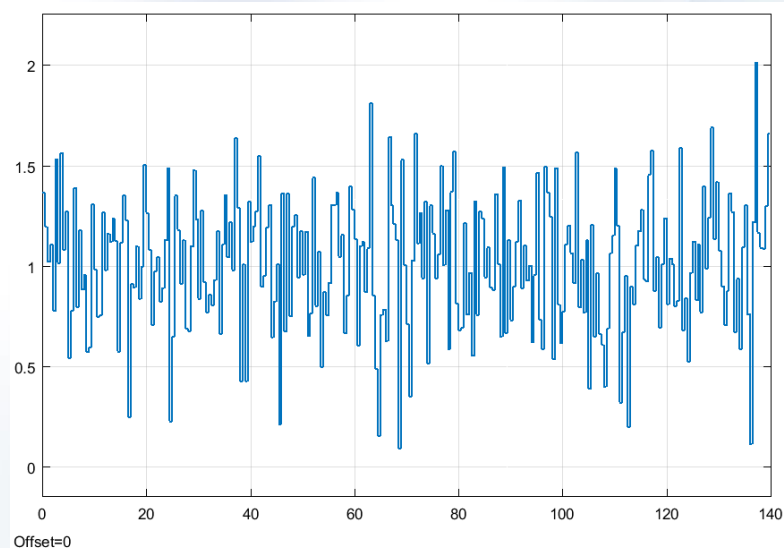
仿真场景3

闭环系统输出（频率波动）



仿真场景：风速为随机风速，光伏发电功率和负载功率不变

由图可得，在风速波动的情况下，所设计的 μ 综合鲁棒控制器相比改进的虚拟惯量控制器和 H_{∞} 控制器系统频率波动更小。



- 3. 含新能源发电的**微网频率控制策略**
 - (1)在微网中**利用新能源发电功率的精确预测**来辅助系统的频率控制：
 - 结合短时**超前风能或风功率预测**与负荷预计消耗的功率相结合，通过对风机采用桨距角控制来减少频率的波动，对于风能或风功率预测的精确度有待进一步的提高。
 - 相当于提高风力发电装机容量中的**可调度容量**部分。

- 3. 含新能源发电的微网频率控制策略
 - (2)在微网中配置一定容量的储能装置来进行频率控制：
 - 压缩空气储能（优点：安全系数高、设备平均寿命长、响应速度快）
 - 抽水蓄能（优点：调度灵活迅速、跟踪负荷变化的能力强、卸载速度迅速灵活等）
 - 飞轮储能（优点：功率密度高、放电时间短、对环境的影响小）
 - 超级电容器储能（优点：功率密度大和响应时间短）
 - 蓄电池储能（优点：能量密度高、使用寿命长、价格比较低）
 - 燃料电池（优点：由化学能直接转换为电能，效能高等）

- 3. 含新能源发电的微网频率控制策略
 - (3)在微网中利用动态可控负荷来进行负荷频率控制，包括可中断负荷、可调度负荷：
 - 如冰箱能够随着电网频率的变化自动改变自身内部的温度，即改变负载消耗的功率，以此来调节频率。在发电量的增加(或减少)或风能波动等情况下，通过对可控的动态负荷有效控制，增加电网频率的稳定。但是随着电网频率变化的可控负荷目前还比较少，大范围的应用需要一定的时间。
 - 另外一种，可以是人为可控的负荷，如中央空调系统，可以在用电高峰期或低谷期，在不影响人体舒适度的情况下，适当控制设定的温度值，以减少或增加有功功率的消耗。

- 3. 含新能源发电的微网频率控制策略
 - (4)在微网中利用电动汽车来进行频率控制：
 - V2G以智能电网技术为支撑，将处于停驶状态的电动汽车作为可移动的分布式储能单元，在受控状态下实现与电网能量和信息的双向交换。电动汽车不仅可以从电网中获得能量，而且在满足电动汽车用户行驶需求的前提下，可将剩余可控电能回馈到电网，用于电网的负荷特性调节、频率响应、备用电源及家庭能源供给等，为系统提供辅助服务，提高了电网运行的可靠性，依赖于电动汽车大规模投入。

