



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 11

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。

电力系统调频和调压哪个技术更难实现？为什么？

- ☐ A 调频更难
- ☐ B 调压更难
- ☐ C 两者一样难

提交

4.5 新能源并网后电力系统电压及无功补偿控制

一、传统电力系统的电压调整

– 1. 电力系统允许的电压偏移：

- 一般控制为 $\pm(5\sim10)\%U_N$ ；
 - 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电压太低的危害

- 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的方法

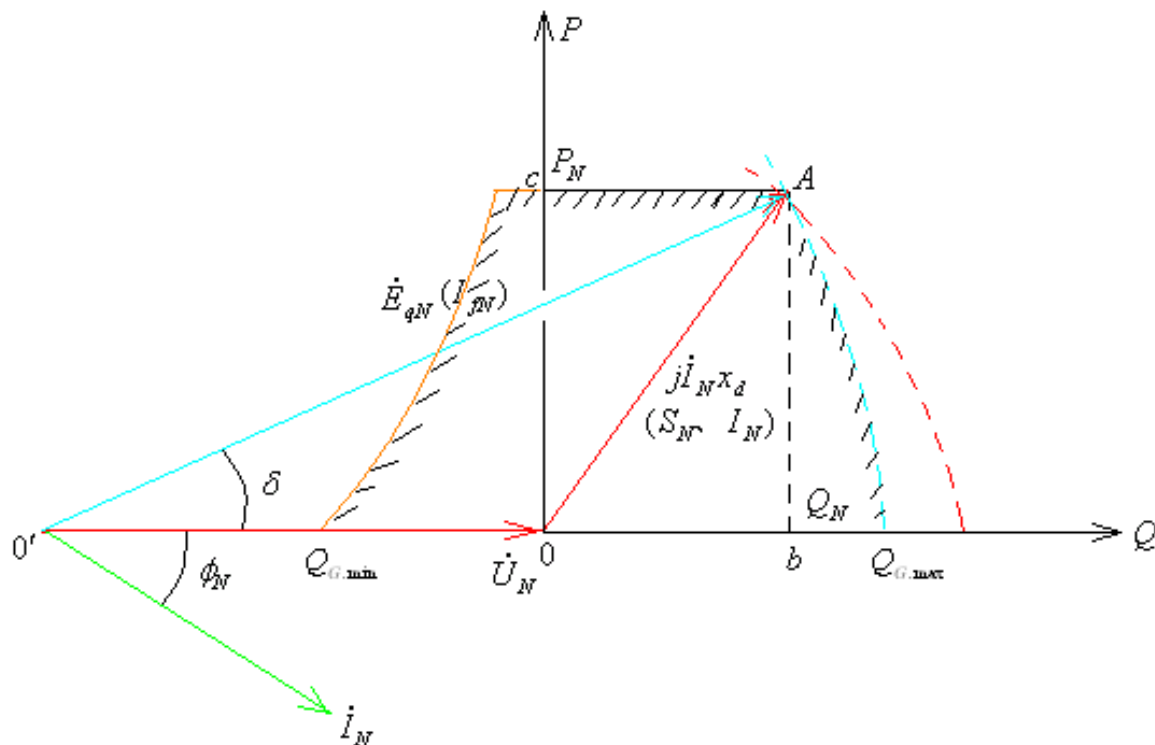
- 改变**发电机机端电压**（不需增加额外的设备）
- 调节**变压器分接头**（需要无功充足，无载调压、有载调压变压器）
- **并联无功补偿**（调相机、电容器、SVC、STATCOM）
- **串联电容器补偿**（改变等值电路的总电抗，是电压损耗减少，达到调压的目的）

调相机、电容器和静止无功补偿器SVC的性能比较表

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

— 6. 同步发电机的无功运行极限

- 定子电流**OA**限制;
 - 励磁电流**O'A**限制
- 发电机的无功出力;
- 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:

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

- 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；
- 无功不足，系统在一个低于额定电压的水平下达到平衡；
- 无功过剩，系统在一个高于额定电压的水平下达到平衡。

- 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。

–应用于运行调度

- ② **无功负荷的最优补偿**：电力系统无功电源容量可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？就是无功负荷的最优补偿问题。

–应用于建设规划

- 1) 无功电源最优分布的目标函数、约束条件、决策变量

- 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: $Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max}, U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}$

- 决策变量

$$Q_{Gi} \quad i = 1, 2, \cdots, n$$

- 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：

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

- 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。

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

- 2) 无功负荷的最优补偿涵盖内容：
 - 最优补偿容量的确定；
 - 最优补偿设备的选址；
 - 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所节约的费用与增加无功补偿设备所支出的运行费用之差取得最大值。

C_e — 增加无功补偿装置后减少的年电能损耗费用

C_c — 增加无功补偿装置后增加的年运行费用

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

- 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。
- 设置补偿设备节点的先后顺序，以网损微增率的大小为序，首先从网损微增率（为负）最小的节点开始。

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial Q_{ci}} = -\beta\tau_{\max} \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} - K_c(\alpha + \gamma) = 0, & (i = 1, 2, \dots, n) \\ \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} = -\frac{(\alpha + \gamma)K_c}{\beta\tau_{\max}}, & (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} \leq -\frac{(\alpha + \gamma)K_c}{\beta\tau_{\max}} = \gamma_{eq}, \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

二、风力发电的无功特性及无功补偿

• 1. 风电场的无功特性（三种风机类型）

1) 恒速风机：异步感应风力发电机组

- 其特点是，本身没有类似于同步发电机励磁调节器的调节装置；
- 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即异步风力发电机组的无功功率消耗特性取决于：风机的有功功率、机端电压和转子转速（转差率）。

- 由异步发电机的RX模型：

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

- 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。
- 有功功率与机端电压 U 的平方成函数关系，且是转差 s 的函数。
- 无功功率是有功功率、机端电压和转差的函数。

二、风力发电的无功特性及无功补偿

- 1. 风电场的无功特性

- 2) 变速风机：双馈感应风电机组（**DFIG**）

- 其特点是，无功输出可由转子电流控制；
 - 在特定的转子转速及相应的有功输出下，产生和吸收的无功功率的可变范围很大。

二、风力发电的无功特性及无功补偿

- 1. 风电场的无功特性

3) 变速风机：永磁直驱同步风电机组（PMSG）

- 其特点是，发电机与电网完全解耦，与电网交换的无功功率不是由发电机特性决定，而是由全功率换流器电网侧的特性决定的；
- 转子转速几乎不影响与电网的无功交互作用；
- 电网侧的功率因数是可以独立控制的。

回顾第一章的低电压穿越的概念，分析第二章所讲的三种类型风机的低电压穿越特性？



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

• 2. 风电接入对系统电压的影响

- 风力发电机组当采用异步发电机时，发电机组需要从电网中吸收无功功率主要用于建立激磁场，进而向电网输出有功功率；
- 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会相应地发生变化，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性。

含异步风机风电场电压稳定性降低，**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也不同。

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

• 3. 风力发电系统的无功补偿方法

(其他新能源发电同样适用)

(1) 首先分析风电无功需求的特点:

1) 异步风电机组需要从电网吸收无功功率以建立磁场:

以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;

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：当风场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过的线路较长，又会增加一定的线损。

(2) 然后确定风电场补偿的容量:

1) 通过无功补偿度确定补偿容量, 即按风电场装机容量的固定比例补偿

(风电场接入电网技术规定[2009]: 无功补偿度不低于**30%~50%**)

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

2) 从调整功率因数需要确定补偿容量

(在发电机出口并联电容补偿, 使风电的功率因数维持在0.97~1.00之间)

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + (Q_{c1} + Q_{c2} + Q_{c3} - Q_1)^2}}$$

(3) 风电场无功补偿的方法:

- 并联电容器组无功补偿(FC)
- 静止无功补偿器 (SVC)
- 静止无功发生器 (STATCOM或称SVG)

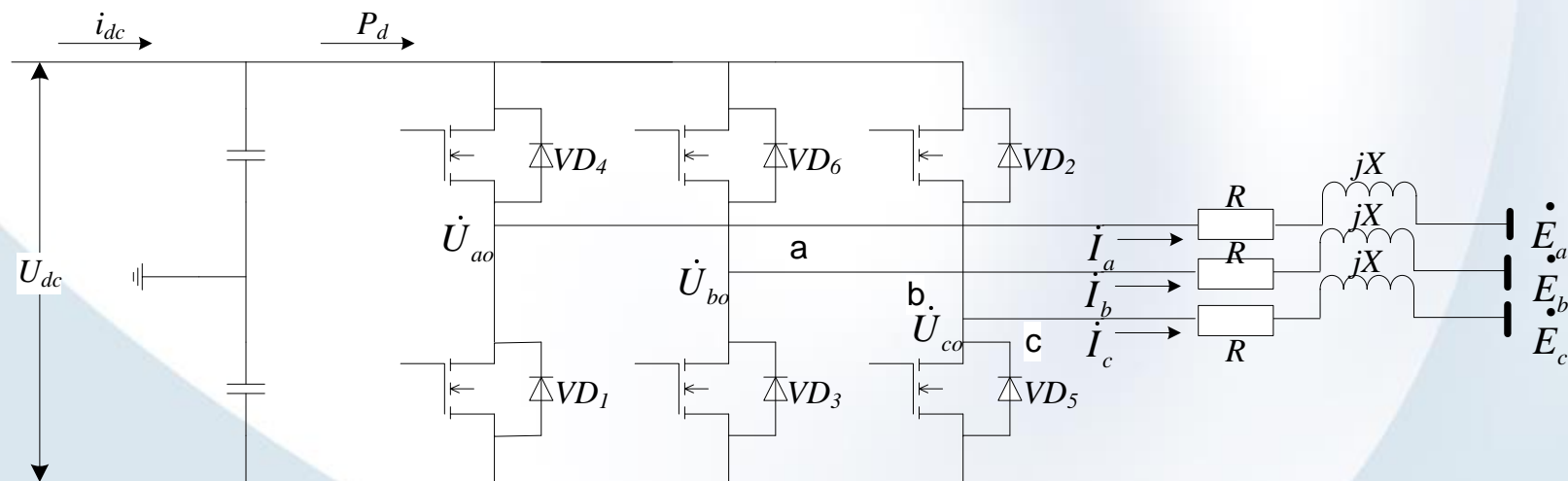
(4) 无功补偿节点的选取:

- 1) 风电场: 风电场集群拓扑的运行情况下, 需考虑各风电场内的无功补偿情况, 可能出现**终端站**与**中心站**多个升压站的情况, 在**充分考虑风机无功出力能力**的条件下, 进行风电场集群内无功补偿点的优化。
- 2) 全系统: 采用**电压-无功 (V-Q) 灵敏度法**选取候选无功补偿节点, 或**电网有功损耗费用和**无功补偿设备费用**综合最小**的优化方法选点。

三、光伏发电的无功特性及无功控制

• 1. 光伏发电的无功特性

- 1) 光伏电池，只接受太阳辐射利用光伏效应输出有功；
 - 2) 光伏直流MPPT控制器部分，只通过软件算法追踪当前光照强度下的最大有功功率；
- 因此，光伏系统前两个环节均不参与无功调节与控制。



光伏发电三相并网示意图

3) 分析逆变侧 (Inverter Side) 输出电压和复功率, 与电网侧 (Grid Side) 电压和复功率的关系:

以电网侧电压为相位参考:

$$\begin{cases} \dot{U}_G = U_G \angle 0^\circ \\ \dot{U}_i = U_i \angle \delta = U_i \cos \delta + j U_i \sin \delta \end{cases}$$

得到并网电流相量为:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_G}{R + j\omega L}$$

忽略电阻 R , 即可得到逆变侧和电网侧的复功率分别如下:

$$\tilde{S}_i = \dot{U}_i \dot{I}^* = \dot{U}_i \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_G}{j\omega L} \right)^* = \frac{U_i U_G \sin \delta}{X} + j \frac{U_i (U_i - U_G \cos \delta)}{X}$$

$$\tilde{S}_G = \dot{U}_G \dot{I}^* = \dot{U}_G \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_G}{j\omega L} \right)^* = \frac{U_i U_G \sin \delta}{X} + j \frac{U_G (U_i \cos \delta - U_G)}{X}$$

$$\tilde{S}_G = \dot{U}_G \dot{I}^* = \dot{U}_G \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_G}{j\omega L} \right)^* = \frac{U_i U_G \sin \delta}{X} + j \frac{U_G (U_i \cos \delta - U_G)}{X}$$

- 逆变器注入电网：

- 有功功率的传输取决于逆变器输出电压的相位，无功功率主要取决于输出电压的幅值。改变逆变器输出电压的幅值和相位，就可以改变逆变器与交流系统之间有功功率和无功功率的大小和方向，能实现在功率平面的四个象限中运行。

- ◆ 逆变器无功运行特性：

如果 $\delta < 0$ ，逆变器需要从电网吸收有功功率；而不带储能装置的光伏阵列的逆变器，只能工作在发电状态，因此必须使光伏阵列工作在 $\delta > 0$ 的状态下。

在 $\delta > 0$ 的情况下，

- $U_i \cos \delta = U_G$ ，逆变器向系统注入有功，与交流系统间没有无功交换；
- $U_i \cos \delta < U_G$ ，逆变器向系统注入有功，吸收感性无功功率；
- $U_i \cos \delta > U_G$ ，逆变器向系统注入有功，并向系统注入感性无功功率。

- 3) 不忽略并网电阻R，逆变器交流侧的复功率为：

$$\begin{aligned}
 \tilde{S} &= \dot{U}_{ao} I_a^* = (U_{ao} \angle 0) \left(\frac{U_{ao} \angle 0 - E_a \angle \alpha}{R - jX} \right) = \frac{U_{ao}^2 \angle 0 - U_{ao} E_a \angle \alpha}{R - jX} \\
 &= \frac{U_{ao}^2 \angle 0 - U_{ao} E_a \angle \alpha}{\sqrt{R^2 + X^2} \angle -\beta} = \frac{U_{ao}^2 \angle \beta - U_{ao} E_a \angle \alpha + \beta}{\sqrt{R^2 + X^2}} \\
 &= \frac{U_{ao}^2 \cos \beta + j U_{ao}^2 \sin \beta - U_{ao} E_a \cos(\alpha + \beta) - j U_{ao} E_a \sin(\alpha + \beta)}{\sqrt{R^2 + X^2}} \\
 &= \frac{U_{ao}^2 \cos \beta - U_{ao} E_a \cos(\alpha + \beta)}{\sqrt{R^2 + X^2}} + j \frac{U_{ao}^2 \sin \beta - U_{ao} E_a \sin(\alpha + \beta)}{\sqrt{R^2 + X^2}}
 \end{aligned}$$



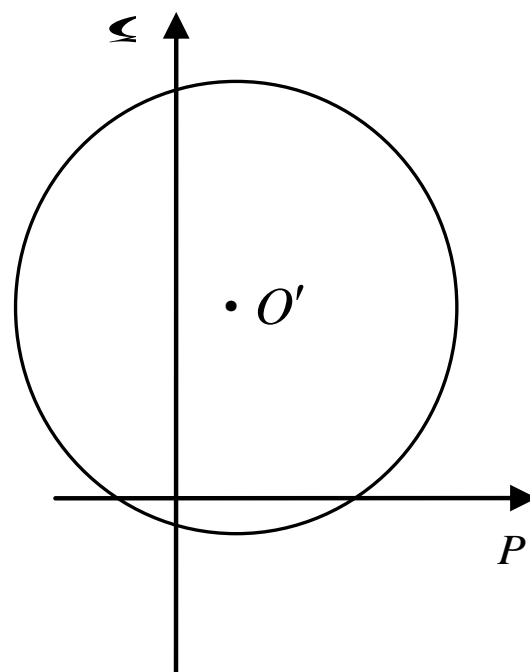
$$\begin{cases} P = \frac{U_{ao}^2 \cos \beta - U_{ao} E_a \cos(\alpha + \beta)}{\sqrt{R^2 + X^2}} \\ Q = \frac{U_{ao}^2 \sin \beta - U_{ao} E_a \sin(\alpha + \beta)}{\sqrt{R^2 + X^2}} \end{cases}$$

- 光伏发电所能提供给电力系统的有功、无功功率的运行特性（功率圆图）：

$$\left(P - \frac{U_{ao}^2 \cos \beta}{\sqrt{R^2 + X^2}}\right)^2 + \left(Q - \frac{U_{ao}^2 \sin \beta}{\sqrt{R^2 + X^2}}\right)^2 = \frac{U_{ao}^2 E_a^2}{R^2 + X^2}$$

圆心： $\left(\frac{U_{ao}^2 \cos \beta}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \frac{U_{ao}^2 \sin \beta}{\sqrt{R^2 + X^2}}\right)$

半径： $\frac{U_{ao} E_a}{\sqrt{R^2 + X^2}}$



光伏逆变器并网功率运行极限示意图

光伏发电的无功运行的限制条件:

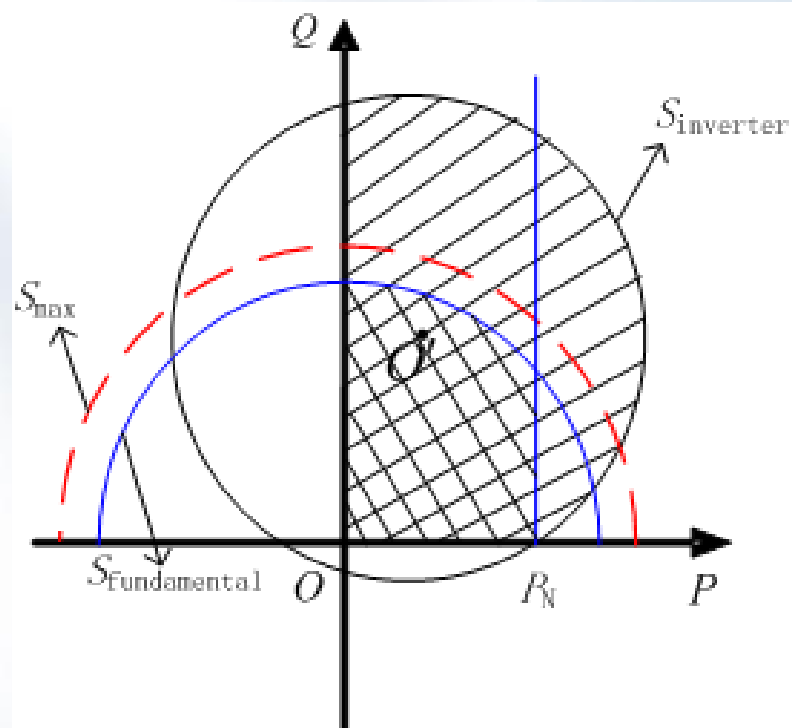
- 1) 考虑并网逆变器**最大容量限制**条件

$$|Q|_{\max}(t) = \sqrt{S_{\max}^2 - P^2(t)}$$

- 2) 考虑电力电子器件所带来的**总谐波电流限制**条件

$$\begin{cases} i(t) = \sum_{k=1}^m I_k \cos(k\omega_1 t + \theta_k) \\ |Q|_{\max}(t) = \sqrt{|I_1|^2 (U^2) - P^2(t)} \end{cases}$$

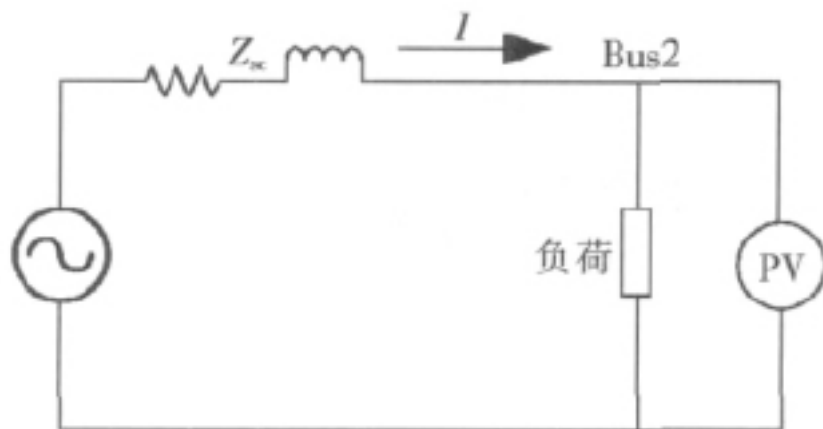
- 3) 考虑**光伏电池当前有功出力**的限制
- 4) 考虑变压器或者滤波器**并网阻抗值**的限制
- 5) 考虑逆变器**最小电流**限制
- 6) 考虑特殊运行方式下的**低电压限电流约束**



• 2. 光伏接入对系统电压的影响

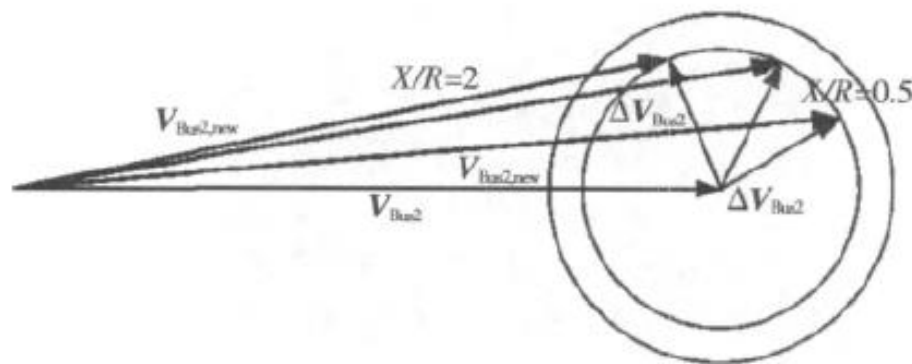
当光照强度变化，导致光伏发电注入系统功率改变时，会使线路上的电流 I 产生 ΔI 的变化。由下图的等效电路，可计算光伏发电并入外部大电网的发电量波动时，在光伏发电并网点 Bus2 上的电压变化值为：

$$\begin{aligned}\Delta \dot{V}_{Bus2} &= (R_{sc} + jX_{sc})(\Delta I_p + j\Delta I_q) \\ &= |Z_{sc}|(\cos \phi_{sc} + j\sin \phi_{sc})|\Delta I|(\cos \theta + j\sin \theta) \\ &= \frac{\Delta S_{pv} V_{bulk}}{S_k} [\cos(\phi_{sc} + \theta) + j\sin(\phi_{sc} + \theta)]\end{aligned}$$



b.

光伏发电接入点的戴维南等效电路图



光伏发电并入点电压变化矢量图

- 光伏发电注入功率变化总容量不变的情况下，其**并入后的节点电压变化**是**以其并入前的电压矢量终点为中心的圆函数簇**。
- 光伏发电接入点的电压变化与以下因素有关：
 - 1) **X/R** ：决定运行的圆弧范围，即决定了光伏电源注入的有功和无功对系统影响程度；
 - 2) **短路容量 S_k** ：决定圆的大小，随着短路容量的增大，网络的电压强度增强，圆也随之变小，即通过控制能达到的电压范围在缩小；
 - 3) **网络电压 V_{bulk}** ：决定圆心的位置及圆大小，可通过改变变压器分接头等方法实现控制；
 - 4) **光伏注入功率**：决定电压变化矢量 ΔV_{Bus2} 的长度和相位。

• 3. 光伏发电对电力系统的无功补偿

- 当光伏电池输出有功功率时，逆变器将直流电变换成交流电输送到电网，同时有选择地对电网补偿一定的无功功率；
- 而当光伏电池输出功率低于某值停止输出时，电压源VSC型逆变器可继续对电网进行无功补偿，等效于一个PV-STATCOM。

光伏电压幅值和相位的调节：

- （1）逆变器输出电压幅值取决于直流电压和PWM逆变器的调制比 m ，可通过控制 m ，实现：

$$U_i = mU_{dc}$$
$$\tilde{S}_G = \dot{U}_G \dot{I}^* = \dot{U}_G \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_G}{j\omega L} \right)^* = \frac{U_i U_G \sin \delta}{X} + j \frac{U_G (U_i \cos \delta - U_G)}{X}$$

- 当逆变器输出电压幅值高于电网电压幅值，向系统补偿感性无功功率；
- 当逆变器输出电压幅值低于电网电压幅值，向系统补偿容性无功功率，即吸收感性无功功率；
- （2）控制PWM的触发角可以控制逆变器输出电压的相位，即可以控制逆变器输出有功功率大小。

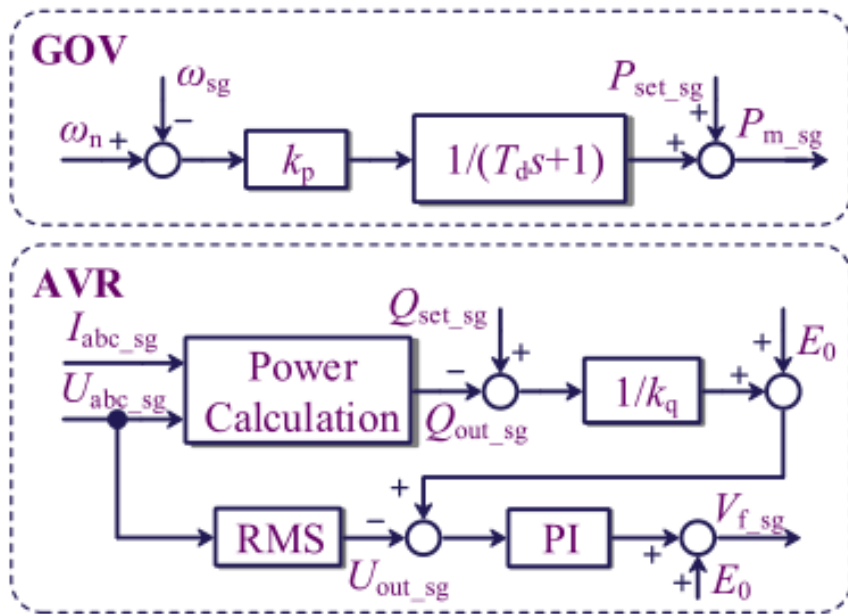
虚拟同步机 (VSG) 技术

- 工作原理：
 - 使并网逆变器能够模拟同步发电机的运行机理、有功调频以及无功调压等特性，使并网逆变器从内部运行机制和外部运行特性上可与传统同步发电机一样，能够促进风电、光伏发电上网的稳定性、安全性，防止脱网。
- 分布式发电和可控负荷均适用：
 - 未来的电力系统在采用虚拟同步机技术后，发电设备和负荷能够通过内在的同步机制自主交互，在不需要人工调节的情况下就可以实现系统的稳定运行。

SG控制原理

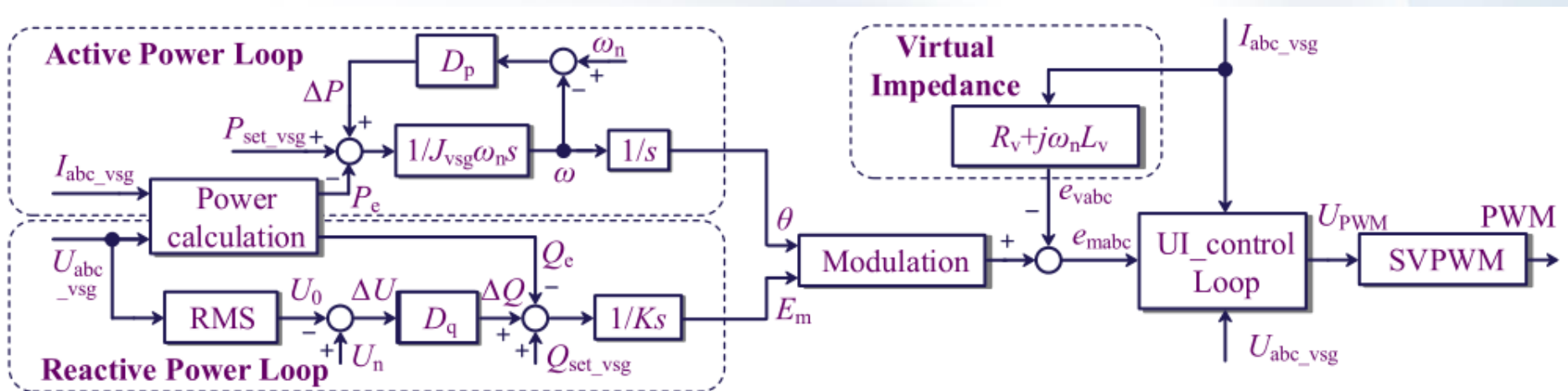
SG控制系统如图所示。它由调速器（GOV）和自动电压调节器（AVR）组成：

- GOV根据SG输出角频率 ω_{sg} 和额定角频率 ω_n 调节原动机功率 P_{m_sg} ，其中 k_p 为调速器比例系数。固有的大惯性造成了功率响应延迟，可能会导致负载扰动后瞬时功率失配。因此在调速器控制回路加入一阶惯性环节即 $1/(T_d s + 1)$ ，以模拟系统的响应延迟，其中 T_d 是调速器惯性响应时间常数。
- AVR作为SG的励磁系统，由励磁调节器和功率单元组成。励磁调节器提供直流励磁电流，间接调节SG励磁电压 V_{f_sg} ，功率单元确保无功功率分配，其中 k_q 为AVR的下垂系数。



VSG控制原理

VSG控制框图如图所示。其中有功和无功功率回路分别通过模拟SG的频率调节器和励磁调节器来实现调节。逆变器输出的三相电流被加到虚拟阻抗模块中，VSG的三相合成电压减去虚拟压降 e_{vabc} 。然后通过电压电流双环控制对输出电压 e_{mabc} 进行调制，最后通过SVPWM获得驱动信号。



$$\begin{cases} P_{set_vsg} + D_p(\omega_n - \omega) - P_e = J_{vsg}\omega_n \frac{d\omega}{dt} \\ Q_{set_vsg} + D_q(U_n - U_0) - Q_e = K \frac{dE_m}{dt} \\ \delta = \int (\omega - \omega_n) dt \end{cases}$$

其中 P_{set_vsg} 和 Q_{set_vsg} 为给定的有功和无功功率， D_p 和 D_q 为有功功率频率（P- ω ）和无功电压（Q-V）的衰减系数， P_e 和 Q_e 为电磁功率， J_{vsg} 和 K 为虚拟转动惯量和电压系数， ω_n 和 ω 分别为额定和实际转子角频率， U_n 和 U_0 为额定电压和实际电压幅值， E_m 为VSG的内电势幅值， δ 为功角。

第四章 小结

- 异步风力发电的稳态潮流模型
 - 简化PQ模型、改进PQ模型、RX模型
- 光伏发电的稳态潮流模型
- 新能源发电的配电网潮流模型、节点类型
- 风力发电的随机潮流模型
 - 风速Weibull分布、风电功率与风速关系
- 光伏发电的随机潮流模型
 - ◆ 光照强度Beta分布、基于半不变量的随机潮流的线性化方法
- 新能源对调频的影响、微网频率控制方法
- 风电场、光伏电站的无功运行特性，风电、光伏对系统电压的影响
- 风电的无功补偿、光伏发电对系统的无功补偿

