



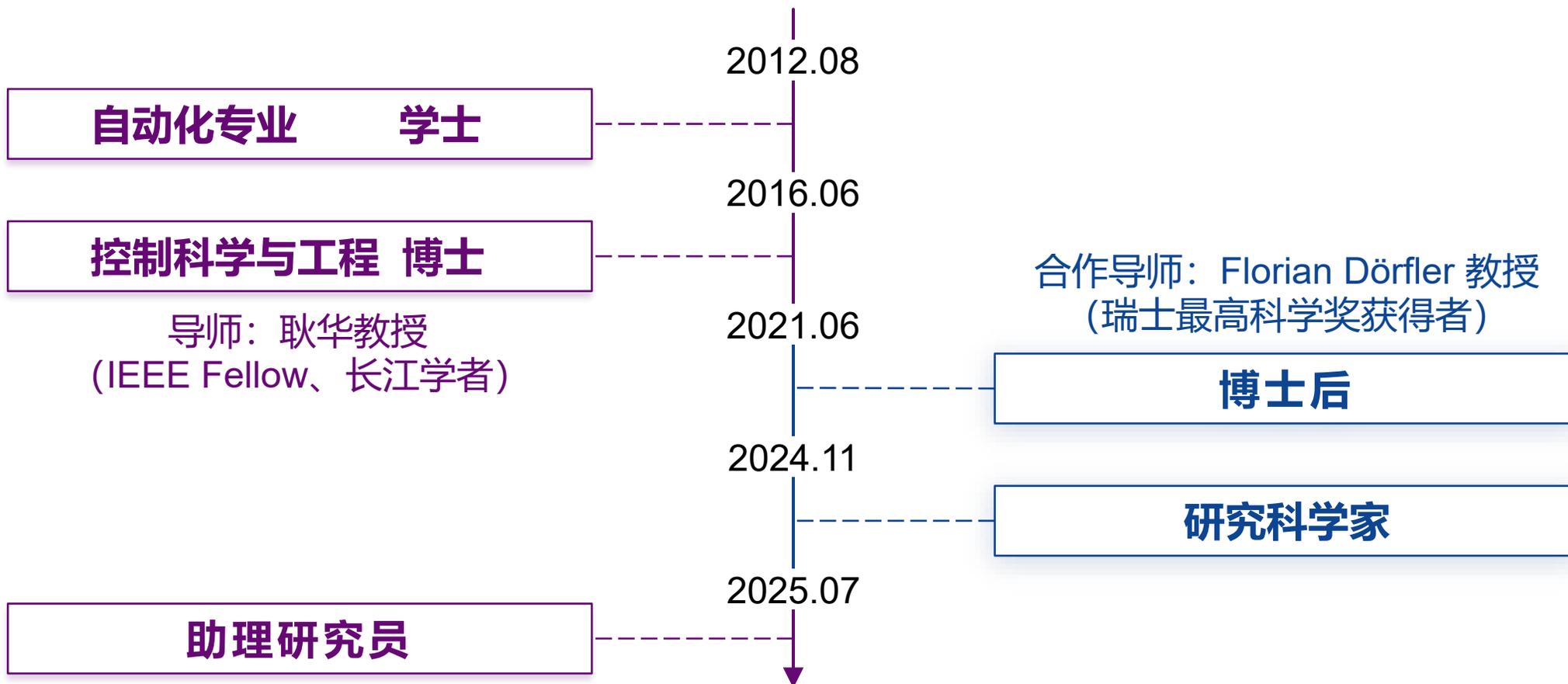
清华大学 自动化系
Department of Automation, Tsinghua University

新能源系统的构网控制与分散式稳定分析

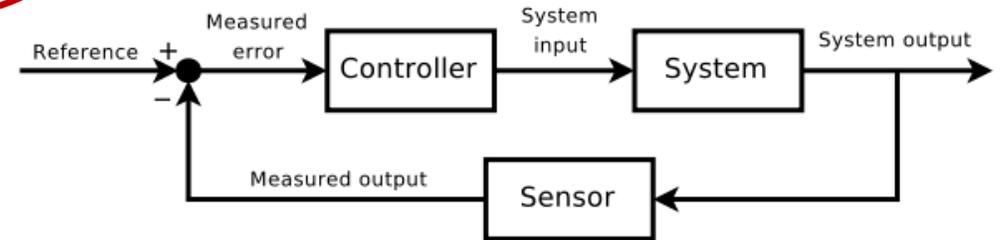
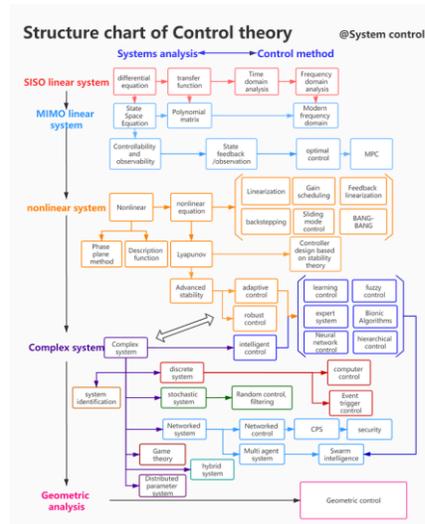
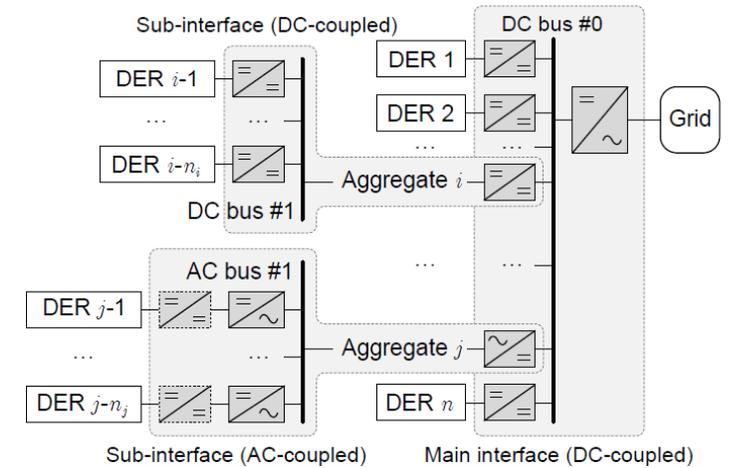
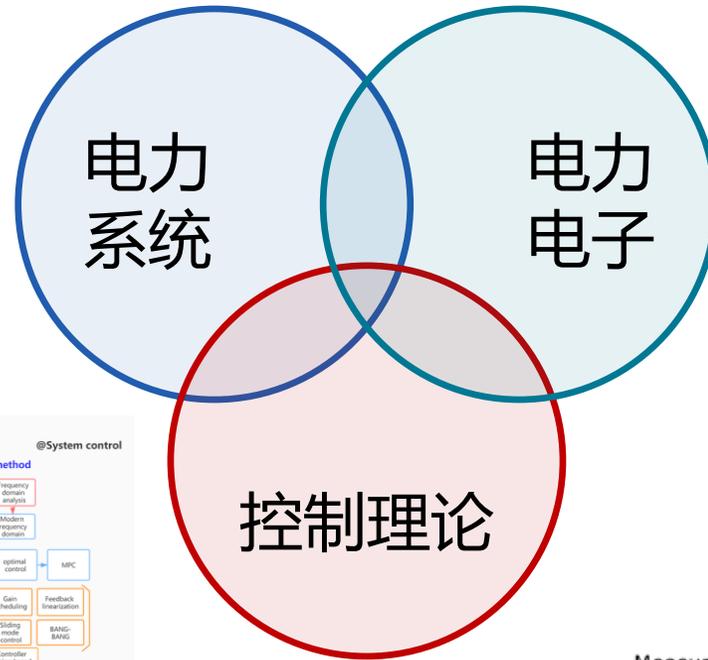
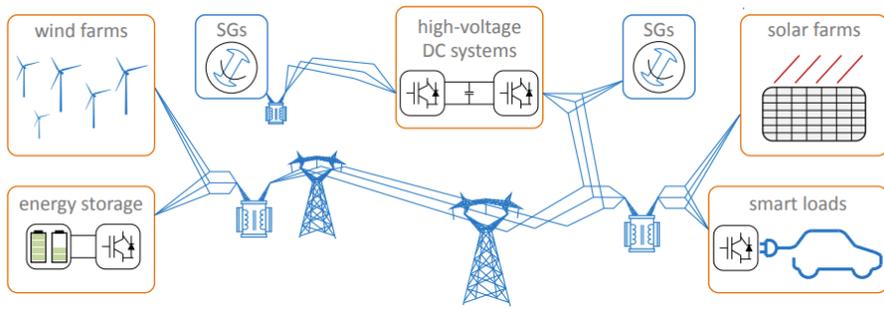
何秀强

清华大学 自动化系
xhe@tsinghua.edu.cn
2026年1月30日

个人基本情况



研究概况

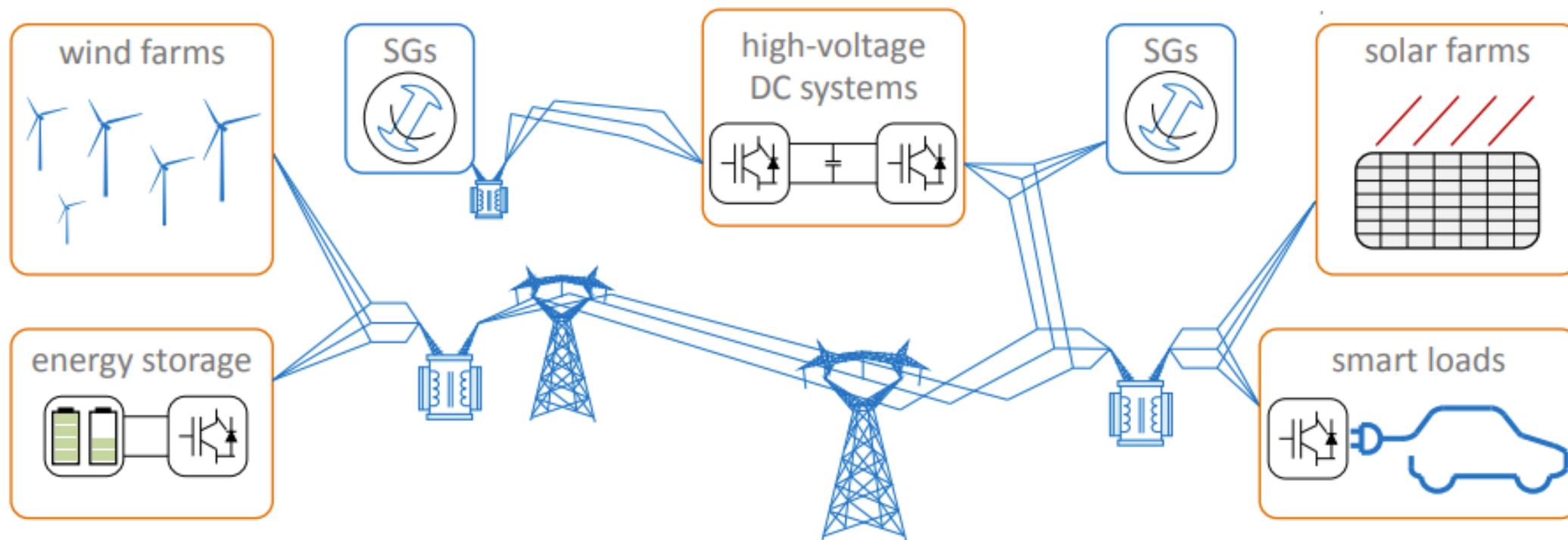


设备 ↔ 系统

理论 ↔ 应用

研究 ↔ 标准

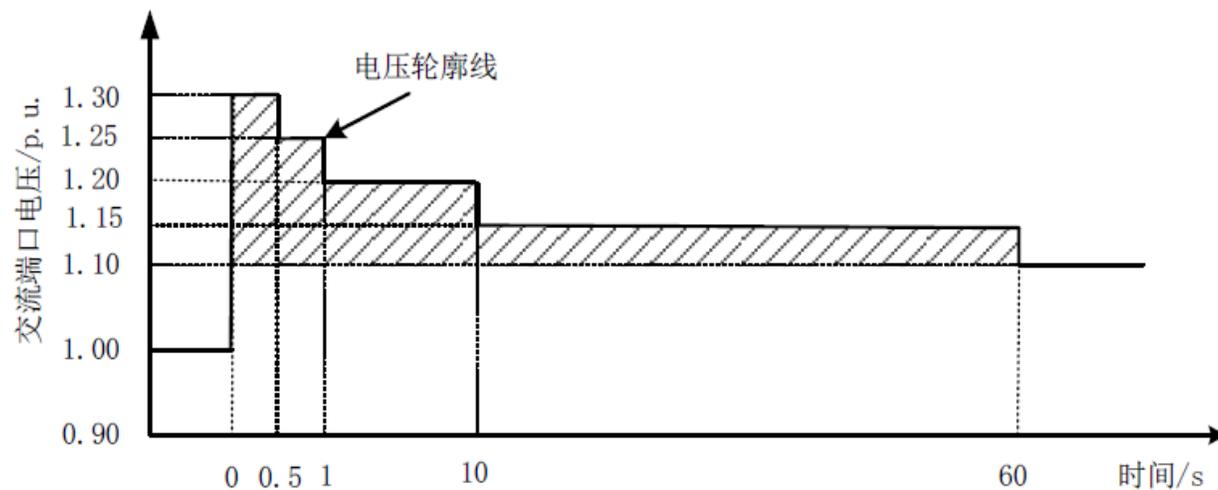
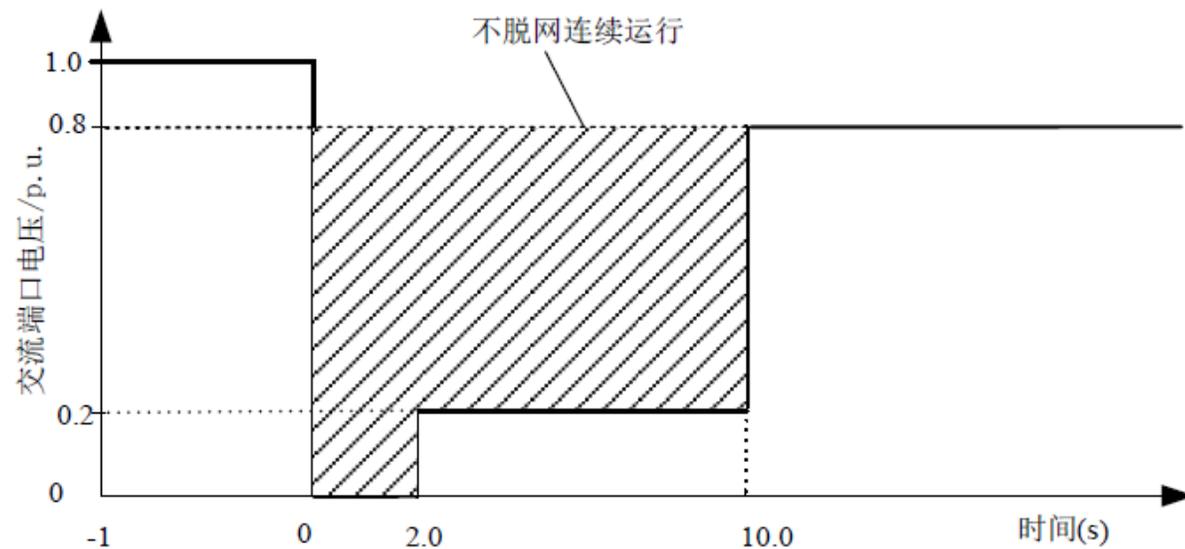
构网型电力电子装备是未来电力系统的关键组成



构网技术的关键难题

- **宽范围稳定运行**

- 电压运行范围（幅值变化、相角跳变）
- SCR范围
- 功率范围 等



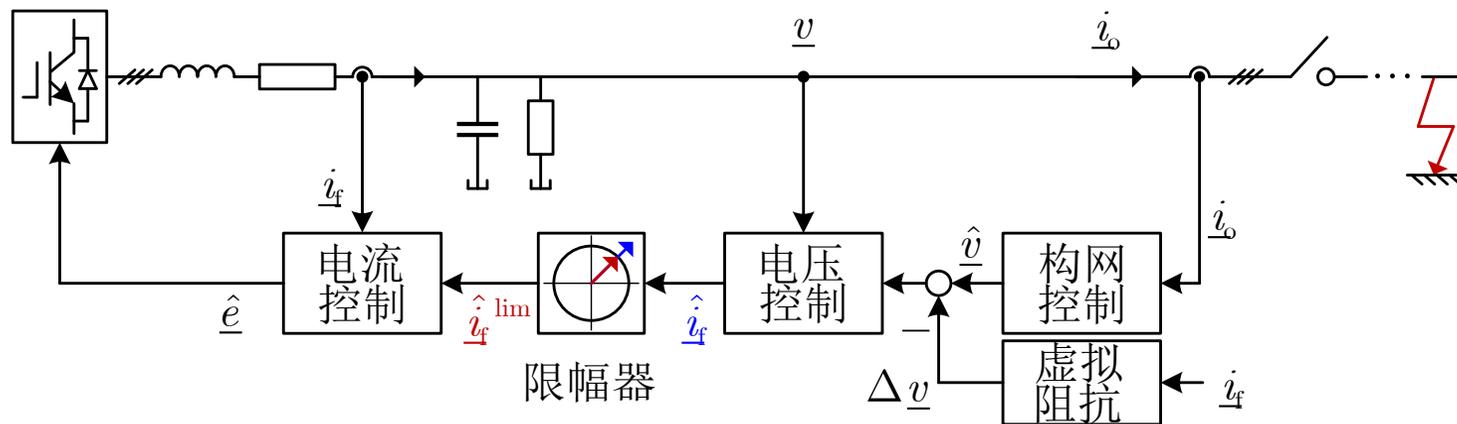
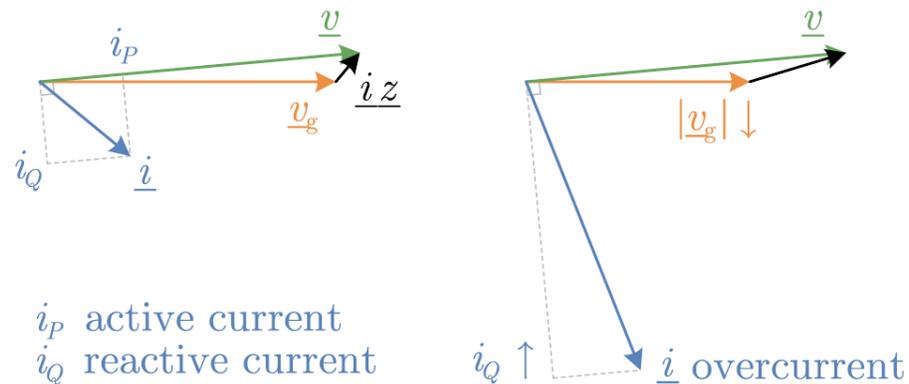
构网技术的关键难题

• 宽范围稳定运行

- 电压运行范围（幅值变化、相角跳变）
- SCR范围
- 功率范围等

• 故障限流与稳定

- 故障限流
- 保持构网
- 保持稳定等



构网技术的关键难题

• 宽范围稳定运行

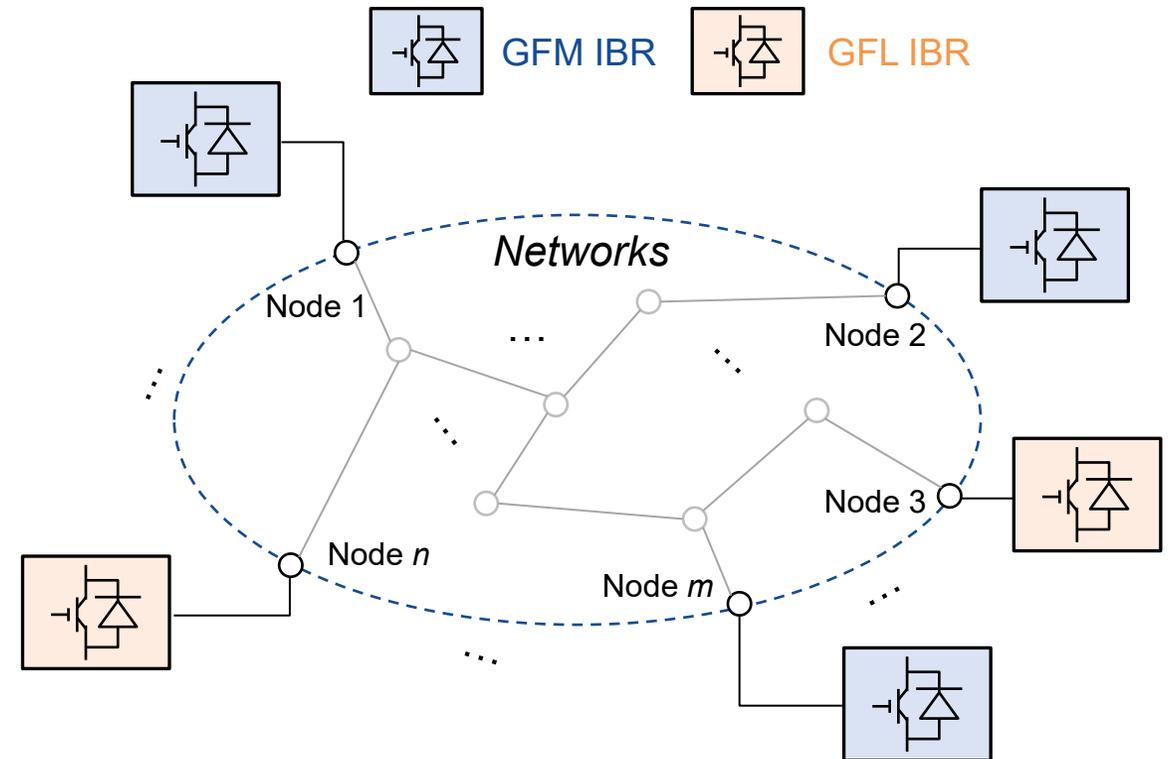
- 电压运行范围（幅值变化、相角跳变）
- SCR范围
- 功率范围等

• 故障限流与稳定

- 故障限流
- 保持构网
- 保持稳定等

• 海量异构装备的稳定

- （虚拟）同步机、下垂、虚拟振荡器
- 跟网PLL、FLL
- 混合模式等



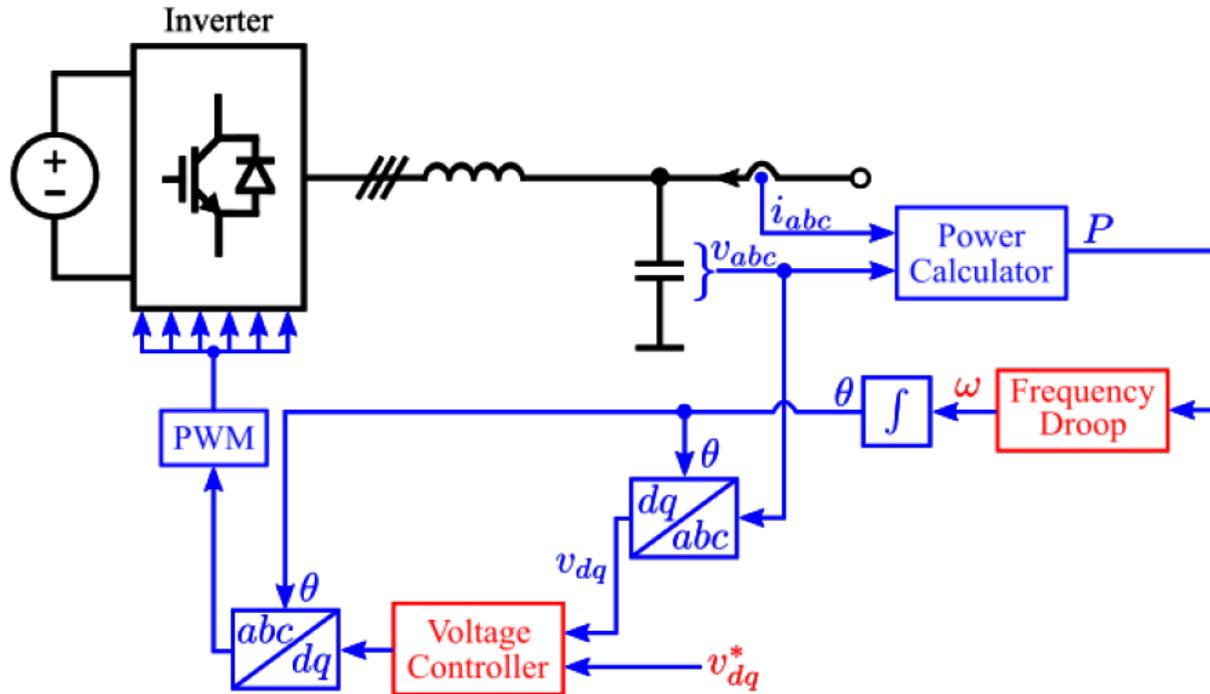
目录

- 一、非线性视角下的构网控制与稳定
- 二、暂态视角下的构网控制与稳定
- 三、分散视角下的构网稳定

经典的构网控制

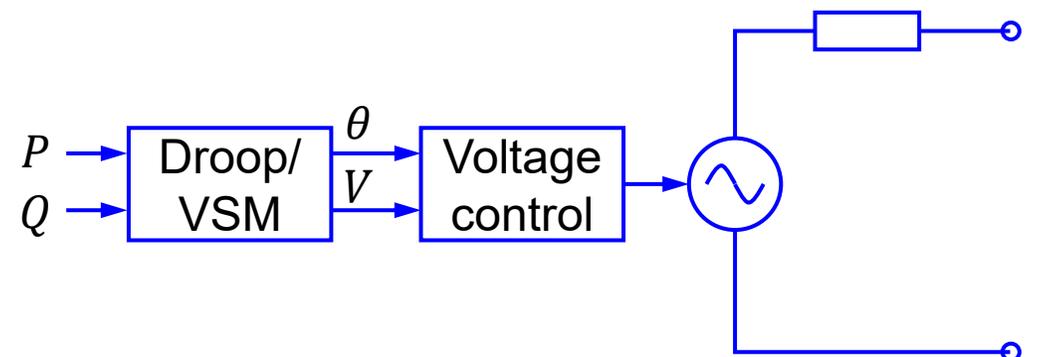
下垂控制

$$\dot{\theta} = \omega_0 + \eta(p^* - p)$$
$$\dot{v} = \eta\alpha(v^* - v) + \eta(q^* - q)$$



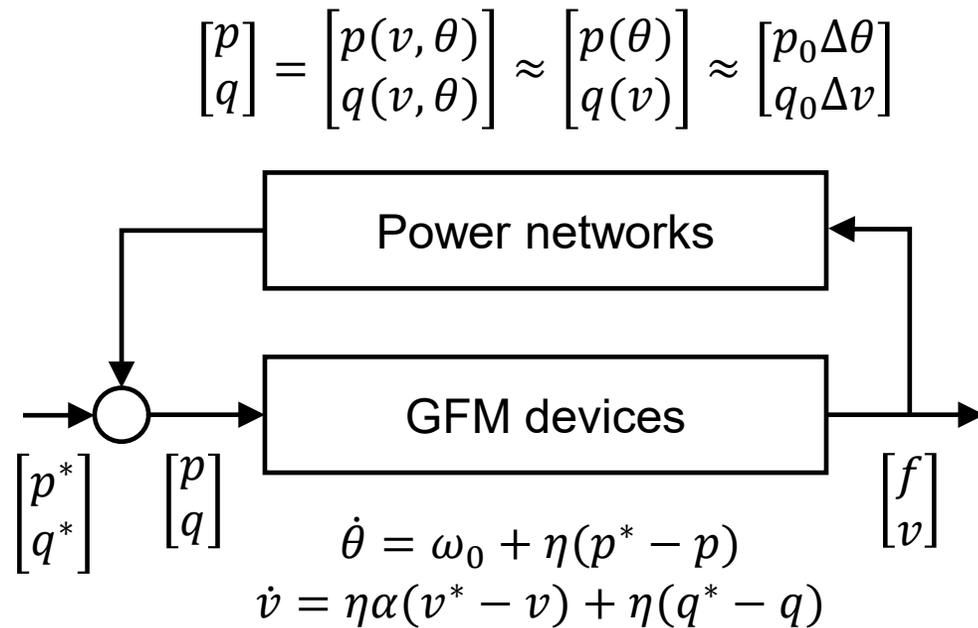
虚拟同步机 (VSM)

$$T_J \ddot{\theta} + D(\dot{\theta} - \omega_0) = p^* - p$$
$$\dot{v} = \eta\alpha(v^* - v) + \eta(q^* - q)$$



经典构网控制的稳定性足够好吗？

- 下垂控制和虚拟同步机的设计基于**解耦**和**线性化**
- 稳态功率分配、小信号稳定性能较好，但**大信号稳定性能不好**



Example:

$$v_g = 0.1, z_g = 0.4 + j0.4$$

$$p^* = 0, q^* = 0, \alpha = 1, v^* = 1, \eta = 0.08$$



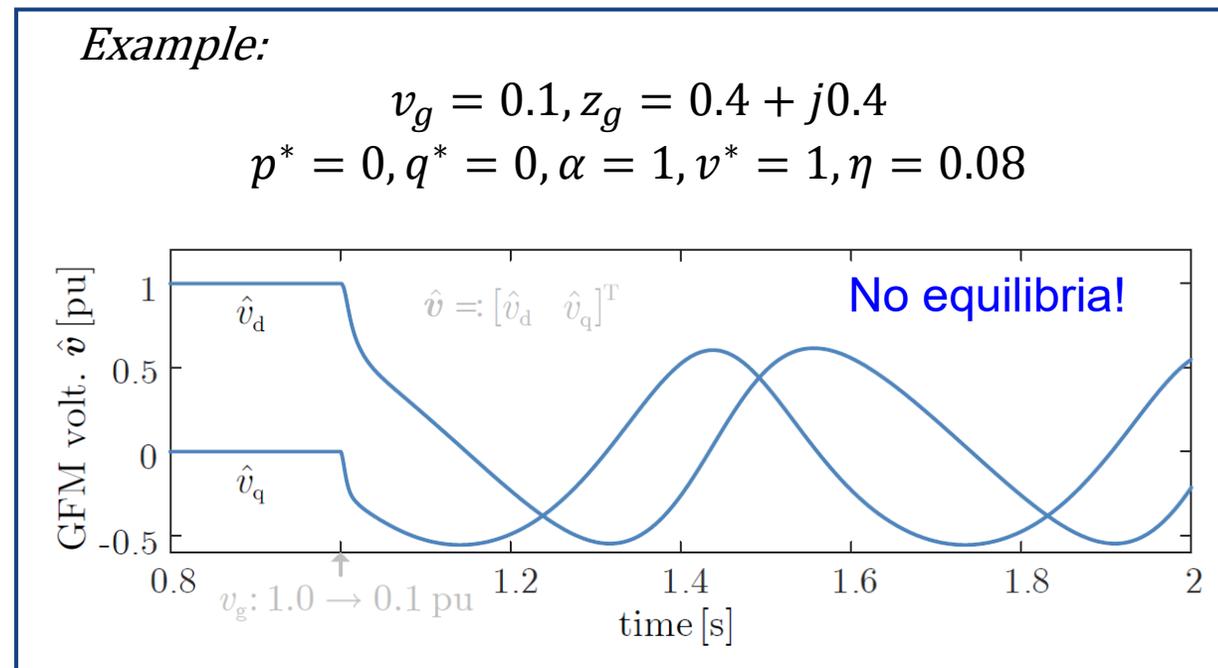
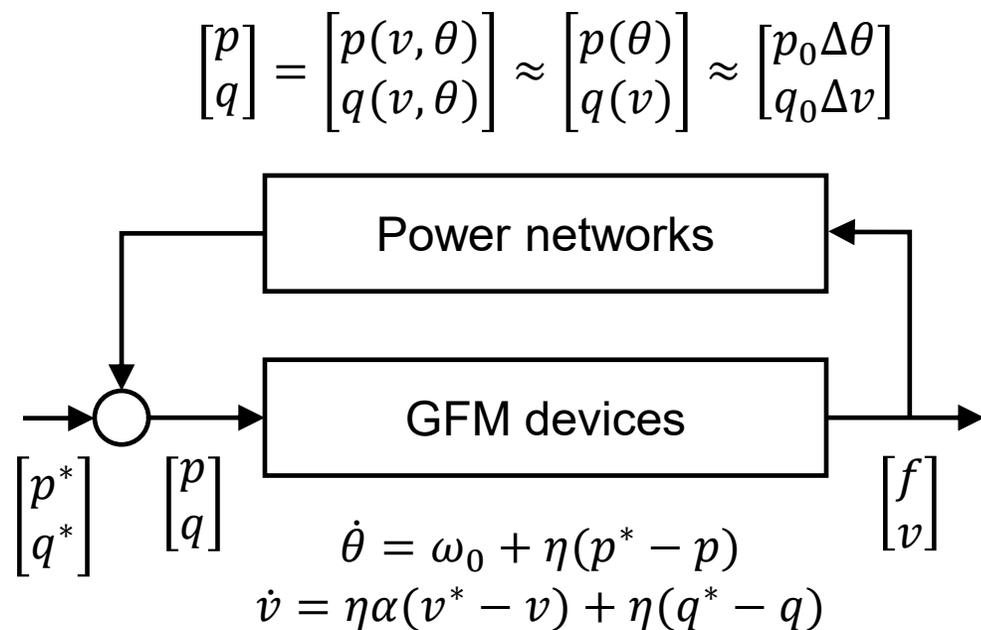
No equilibria!

$$0 = p^* - \frac{-v^2 \sin \phi + vv_g \sin(\delta + \phi)}{|z_g|}$$

$$0 = \alpha(v^* - v) + \left(q^* - \frac{v^2 \cos \phi - vv_g \cos(\delta + \phi)}{|z_g|} \right)$$

经典构网控制的稳定性足够好吗？

- 下垂控制和虚拟同步机的设计基于**解耦**和**线性化**
- 稳态功率分配、小信号稳定性能较好，但**大信号稳定性能不好**



- 主要原因？ **两个线性的、单入单出 (SISO) 的环路控制多入多出 (MIMO)**
- 需要**MIMO非线性**构网控制，以确保大信号范围下的构网稳定性！

提出复频率下垂控制 (complex-frequency droop control)

• 复矢量回顾

– 复电压矢量

$$\underline{v} = v e^{j\theta}$$

– 复角度矢量

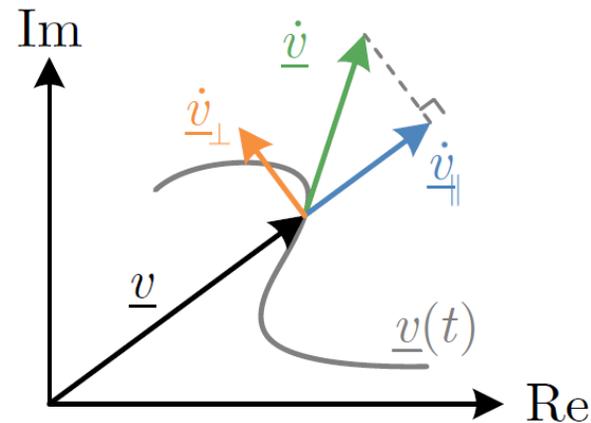
$$\underline{\vartheta} := \ln v + j\theta$$

– 复频率矢量

$$\underline{\omega} := \dot{\underline{\vartheta}} = \frac{\dot{v}}{v} + j\dot{\theta}$$

– 复功率矢量

$$\underline{s} = p + jq$$



Complex frequency := $\varepsilon + j\omega$

$$\varepsilon = \frac{\underline{\dot{v}}_{\parallel} \bar{v}}{v^2} = \frac{|\underline{\dot{v}}_{\parallel}|}{v}$$



电压幅值变化率

$$j\omega = \frac{\underline{\dot{v}}_{\perp} \bar{v}}{v^2} = j \frac{|\underline{\dot{v}}_{\perp}|}{v}$$

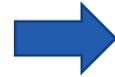


电压角度变化率 (角速度)

提出复频率下垂控制 (complex-frequency droop control)

- **复频率下垂控制**

- 控制反馈: 复功率
- 控制输出: 复频率



多输入多输出构网
超越经典单输入单输出构网

经典下垂

$$\dot{\theta} = \omega_0 + \eta (p_\varphi^* - p_\varphi)$$

复频率下垂

$$\underline{\dot{\theta}} = j\omega_0 + \eta e^{j\varphi} \left(\frac{p^* - jq^*}{v^{*2}} - \frac{p - jq}{v^2} \right) + \eta \alpha \frac{v^{*2} - v^2}{v^{*2}}$$

复频率下垂等价于可调度虚拟振荡控制 (dVOC)



Equivalent

$$\underline{\dot{\theta}} = \frac{\dot{v}_\alpha + j\dot{v}_\beta}{v_\alpha + jv_\beta}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_\alpha \\ \dot{v}_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\omega_0 \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}}_{\text{oscillation at } \omega_0} + \eta e^{j\varphi} \underbrace{\left(\frac{1}{v^{*2}} \begin{bmatrix} p^* & q^* \\ -q^* & p^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \right)}_{\text{synchronization through current feedback}} + \eta \alpha \underbrace{\frac{v^{*2} - v^2}{v^{*2}} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}}_{\text{voltage regulation}}$$

经典下垂控制 vs 复频率下垂控制

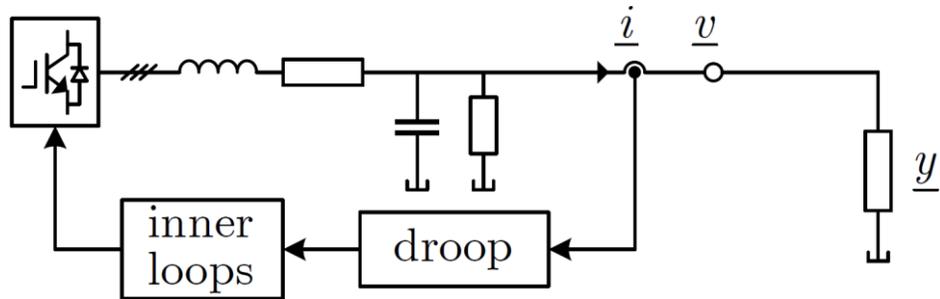
	经典下垂	复频率下垂
控制器	$\dot{v} = \eta (q^* - q) + \eta \alpha (v^* - v),$ $\dot{\theta} = \omega_0 + \eta (p^* - p).$	$\frac{\dot{v}}{v} = \eta \left(\frac{q^*}{v^{*2}} - \frac{q}{v^2} \right) + \eta \alpha \frac{v^* - v}{v^*}, \text{ or } + \eta \alpha \frac{v^{*2} - v^2}{v^{*2}},$ $\dot{\theta} = \omega_0 + \eta \left(\frac{p^*}{v^{*2}} - \frac{p}{v^2} \right).$
设计假设	运行点额定点附近	大信号范围
设计原则	启发自同步机 或者基于线性化潮流的比例控制	复频率下垂启发自复频率重述 dVOC启发自一致性同步
区别	<ul style="list-style-type: none"> 标准的 v、θ 极坐标; 标准的 p、q 功率反馈. 	<ul style="list-style-type: none"> 复角度 ($\ln v + j\theta$) 坐标; 规范化的 p/v^2、q/v^2 功率反馈.
稳定性	小信号稳定性保证, 但大信号稳定性无法保证 (运行点远离额定点)	小信号和大信号稳定性均理论保证
功率分配	具备能力	具备能力

经典下垂控制 vs 复频率下垂控制

	经典下垂	复频率下垂
控制器	$\dot{v} = \eta (q^* - q) + \eta \alpha (v^* - v),$ $\dot{\theta} = \omega_0 + \eta (p^* - p).$	$\frac{\dot{v}}{v} = \eta \left(\frac{q^*}{v^{*2}} - \frac{q}{v^2} \right) + \eta \alpha \frac{v^* - v}{v^*}, \text{ or } + \eta \alpha \frac{v^{*2} - v^2}{v^{*2}},$ $\dot{\theta} = \omega_0 + \eta \left(\frac{p^*}{v^{*2}} - \frac{p}{v^2} \right).$
设计假设	运行点额定点附近	大信号范围
设计原则		
区别		
稳定性		
功率分配		

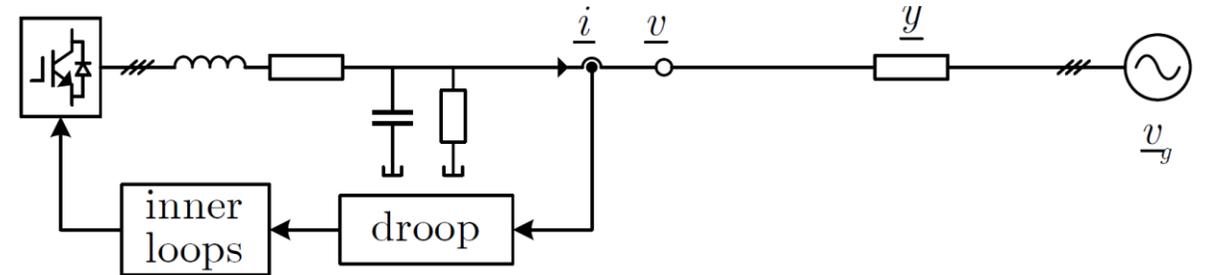
稳定性结果 (1) : 构网控制本身的稳定性

- 理论结果: 在微电网和并网场景下, 复频率下垂控制都具有全局稳定性



$$\dot{\mathbf{v}} = [\omega_0 \mathbf{J} + \eta(\mathbf{S}_\varphi^* - \mathbf{Y}_\varphi) + \eta\alpha \mathbf{I}_2] \mathbf{v} - \frac{\eta\alpha}{v^{*2}} \|\mathbf{v}\|^2 \mathbf{v}$$

$$\operatorname{Re}\left\{e^{j\varphi} \frac{p^* - jq^*}{v^{*2}}\right\} + \alpha \leq \operatorname{Re}\{e^{j\varphi} \underline{y}\}$$



$$\dot{\mathbf{v}} = [\omega_\Delta \mathbf{J} + \eta(\mathbf{S}_\varphi^* - \mathbf{Y}_\varphi)] \mathbf{v} + \eta \mathbf{Y}_\varphi \mathbf{v}_g + \eta\alpha \Phi(\mathbf{v}) \mathbf{v}$$

$$\operatorname{Re}\left\{e^{j\varphi} \frac{p^* - jq^*}{v^{*2}}\right\} + \alpha < \frac{1}{2} \frac{\alpha}{v^{*2}} \|\mathbf{v}_s\|^2 + \operatorname{Re}\{e^{j\varphi} \underline{y}\}$$

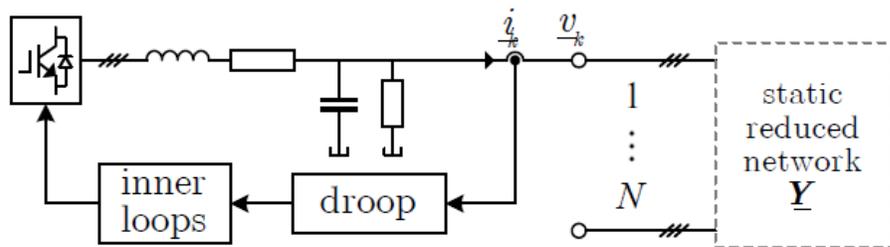
↓
设定点

↓
控制增益

↓
电压稳态

↓
短路比

稳定性结果 (1) : 构网控制本身的稳定性

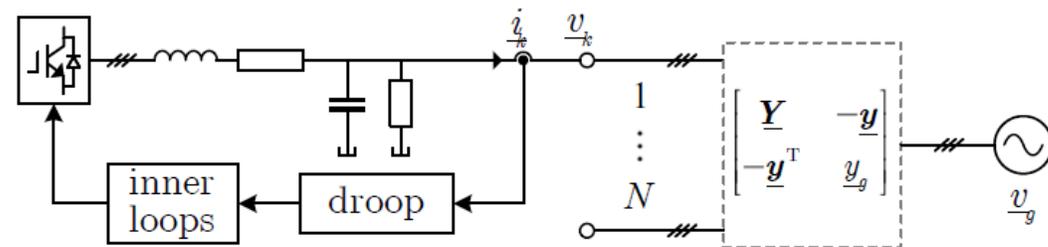


$$\dot{\underline{v}} = j\omega_0 \underline{v} + \eta e^{j\varphi} [\text{diag}(\underline{\bar{\varsigma}}_k^*) - \underline{\mathbf{Y}}] \underline{v} + \eta \alpha \text{diag}\left(\frac{v_k^* - v_k}{v_k^*}\right) \underline{v}$$

$$V := \frac{1}{2} \underline{v}^H \underline{\mathbf{P}} \underline{v} + \frac{1}{2} \eta \alpha \alpha_1 \sum_{k=1}^N \left(\frac{v_k^{*2} - |v_k|^2}{v_k^*} \right)^2$$

$$\max_k \text{Re}\{e^{j\varphi} \underline{\bar{\varsigma}}_k^*\} + \alpha < \frac{(1 + \cos \bar{\delta})(1 - \bar{\gamma})^2}{2} \lambda_2(\text{Re}\{e^{j\varphi} \underline{\mathbf{Y}}\})$$

网络连通度



$$\dot{\underline{v}} = \underline{\omega}_0 \underline{v} + \eta e^{j\varphi} [\text{diag}(\underline{\bar{\varsigma}}_k^*) - \underline{\mathbf{Y}}] \underline{v} + \eta \alpha \text{diag}\left(\frac{v_k^* - v_k}{v_k^*}\right) \underline{v} + \eta e^{j\varphi} \underline{\mathbf{y}} \underline{v}_g$$

$$V := \frac{1}{2} (\underline{v}_{dq} - \underline{v}_s)^H (\underline{v}_{dq} - \underline{v}_s)$$

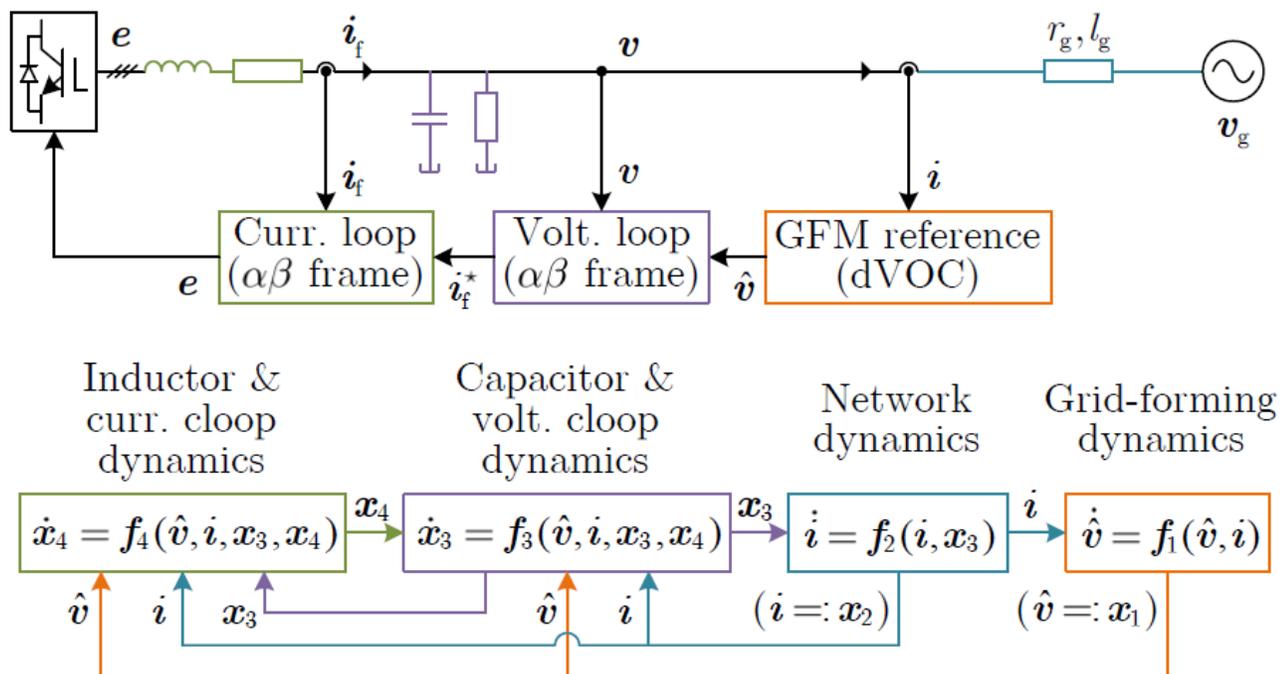
$$\max_k \text{Re}\{e^{j\varphi} \underline{\bar{\varsigma}}_k^*\} + \alpha < \frac{\alpha}{2} \frac{v_{s\min}^2}{v_{\max}^{*2}} + \lambda_1(\text{Re}\{e^{j\varphi} \underline{\mathbf{Y}}\})$$

广义短路比

稳定性结果 (2) : 多时间尺度动态的稳定性

• 理论结果: 复频率下垂控制多时间尺度系统是稳定的

→ 一般性方法: 嵌套奇异摄动理论



构网本身稳定条件

$$\text{Re}\left\{e^{j\varphi} \frac{p^* - jq^*}{v^{*2}}\right\} + \alpha + c_1 < \frac{1}{2} \frac{\alpha \|\mathbf{v}_s\|^2}{v^{*2}} + \text{Re}\{e^{j\varphi} \underline{y}\},$$

$$0 < \eta < \frac{c_1}{\frac{l_g}{r_g} \|\mathbf{Y}\| (c_1 + c_\epsilon)},$$

$$0 < \frac{1 + k_r^v/k_p^v}{k_r^v/c_f - 1} < \frac{4c_2}{\frac{1}{r_g} \eta (c_\epsilon^2 + 4)},$$

$$0 < \frac{1 + k_r^c/k_p^c}{k_r^c/l_f - 1} < \frac{4c_3}{\frac{\beta_{34}}{\beta_{43}} (\tilde{\beta}_{41}^2 + \tilde{\beta}_{42}^2 + 4\tilde{\beta}_{43}^2) + c_3 \tilde{\gamma}_4},$$

时间尺度分割量化条件

I. Subotić, D. Groß, M. Colombino and F. Dörfler, IEEE TAC, 2021.

X. He, V. Häberle, I. Subotić, and F. Dörfler, IEEE L-CSS, 2023

稳定性结果 (3) : 与其他装备互联系统的稳定性

- 理论结果: 复下垂控制是无源的

$$\dot{\underline{v}}_k = j\omega_\Delta \underline{v}_k + \eta_k e^{j\varphi} \left(\frac{p_k^* - jq_k^*}{v_k^{*2}} \underline{v}_k - \underline{i}_k \right) + \eta_k \alpha_k \frac{v_k^{*2} - |\underline{v}_k|^2}{v_k^{*2}} \underline{v}_k$$

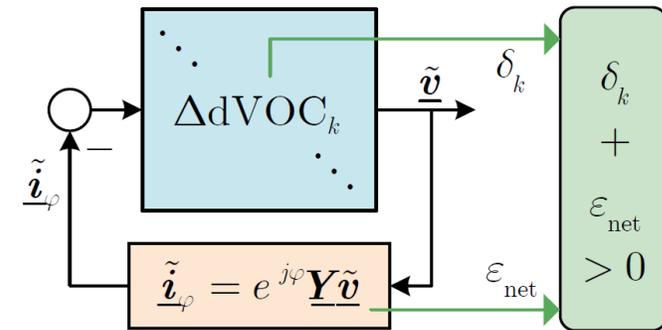
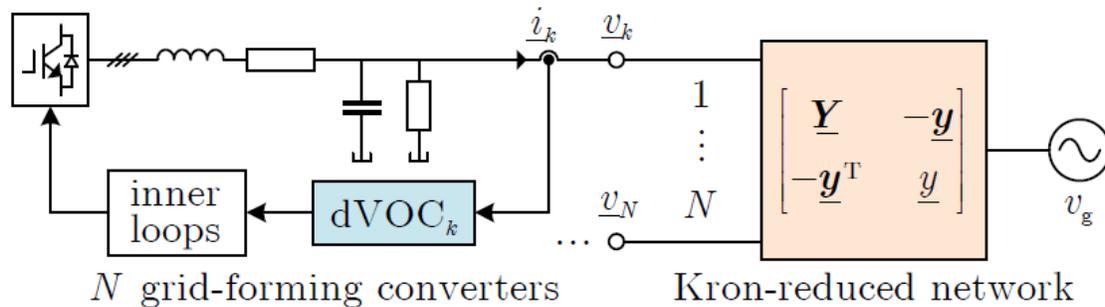
↓ 节点无源性指标

$$\delta_k := -\operatorname{Re}\left\{e^{j\varphi} \frac{p_k^* - jq_k^*}{v_k^{*2}}\right\} - \alpha_k + \alpha_k \frac{1}{2v_k^{*2}} |\underline{v}_{s,k}|^2.$$

$$\underline{i} = \underline{Y} \underline{v} - \underline{y} v_g$$

↓ 网络无源性指标

$$\varepsilon_{\text{net}} := \lambda_{\min}(\operatorname{Re}\{e^{j\varphi} \underline{Y}\})$$



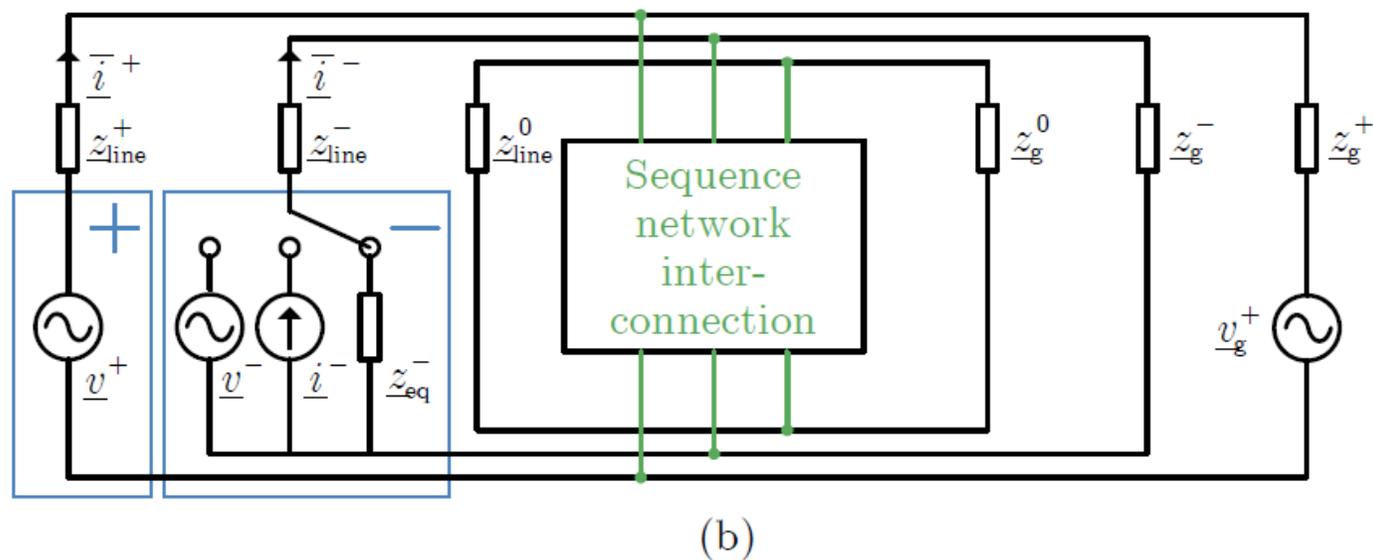
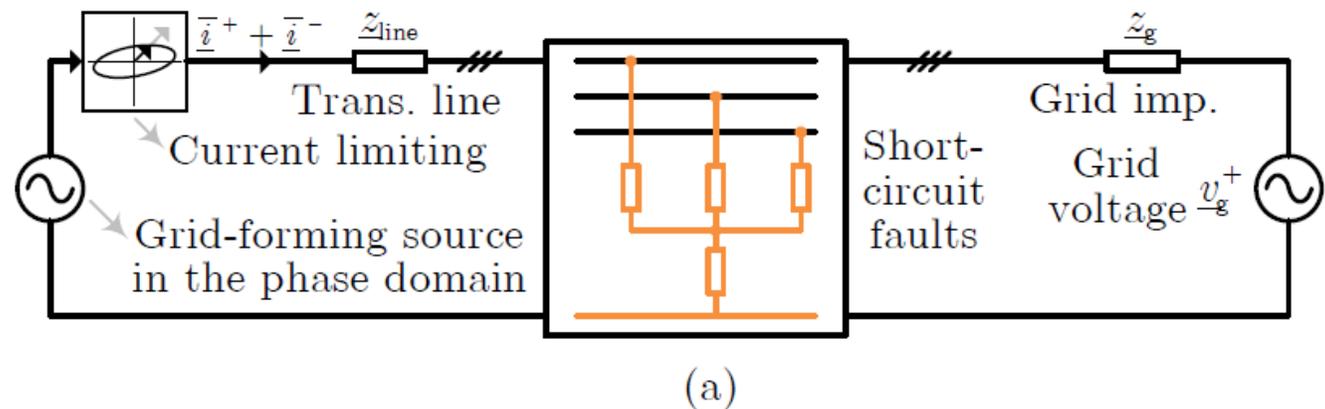
↓ 分散式稳定性条件

目录

- 一、非线性视角下的构网控制与稳定
- 二、暂态视角下的构网控制与稳定
- 三、分散视角下的构网稳定

暂态视角下的构网目标

- **相电流限幅**
- **频率同步**
- **正序构网支撑**
 - 电压跌落：提供故障无功电流
 - 相角跳变：提供跳相有功电流
 - 5 ms 到 30 ms 内响应完成
- **负序控制**
 - 负序构网？没必要
 - 负序注入电流，消除有功二倍频波动
 - 负序模拟阻抗，吸收无功电流，提升电压平衡度
(第五节讨论)
- 其他（直流电压控制、有源阻尼、谐波抑制.....）



构网（构压） vs. 跟网（构流）

	构压（电压构造控制）	构流（电流构造控制）
示意		
案例	下垂、虚拟同步机、复下垂等	锁相等
电压	电压角度和幅值构造	电压角度和幅值跟随
电流	电流角度和幅值跟随	电流角度和幅值构造
Current limiting	需要额外措施限流	具备固有限流能力

构网限流方法 (1) : 自适应虚拟阻抗限流

原理:

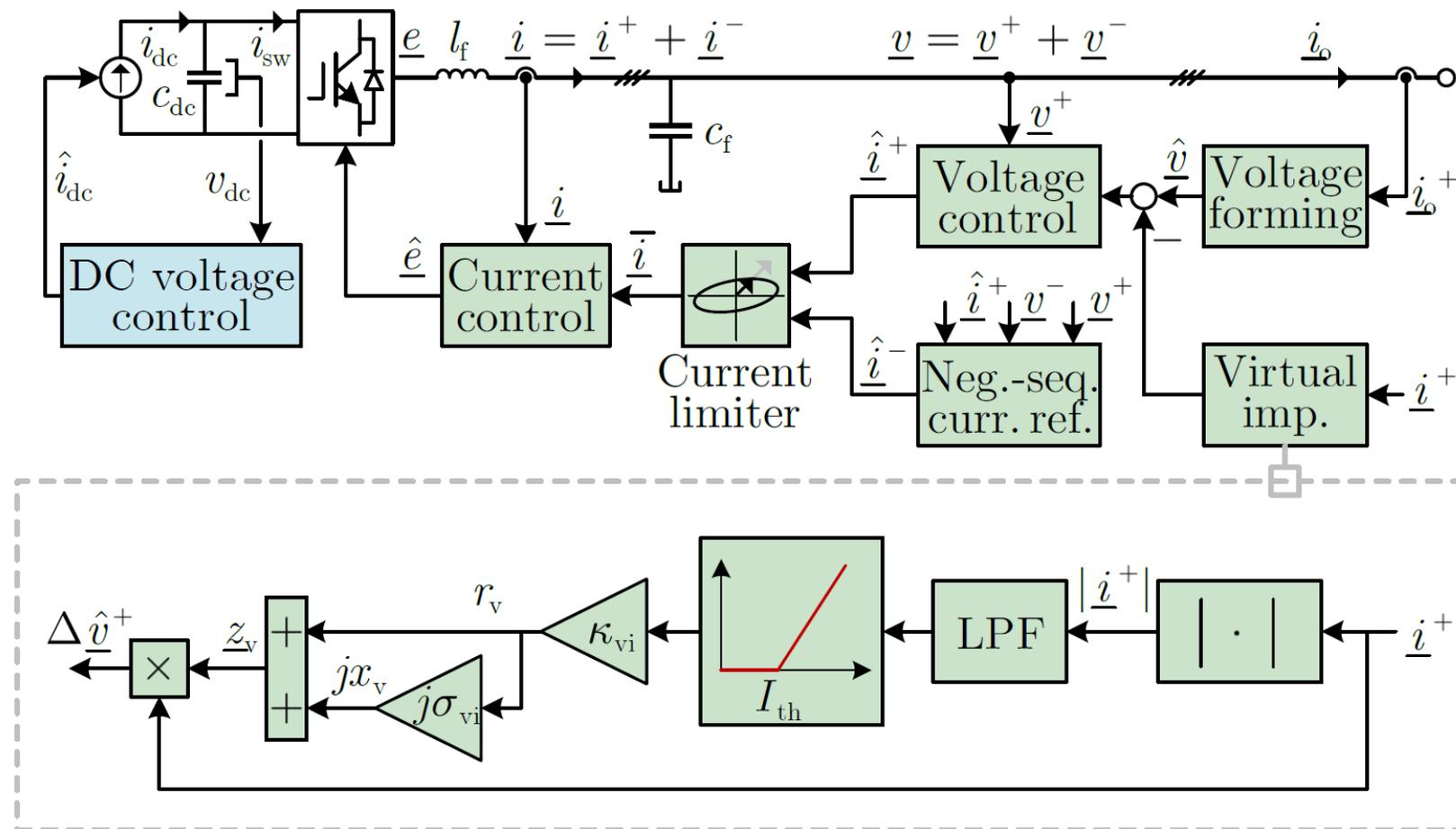
$$r_v = \begin{cases} 0, & |\hat{i}| \leq I_{th} \\ \kappa_{vi} (|\hat{i}| - I_{th}), & |\hat{i}| > I_{th} \end{cases}$$

$$x_v = \sigma_{vi} r_v$$

$$\begin{aligned} |\hat{v}| &\leq |\hat{i}| r_v + jx_v = |\hat{i}| \kappa_{vi} \sqrt{\sigma_{vi}^2 + 1} (|\hat{i}| - I_{th}) \\ &\leq I_{lim} \kappa_{vi} \sqrt{\sigma_{vi}^2 + 1} (I_{lim} - I_{th}) \\ \Rightarrow \kappa_{vi} &\geq \frac{|\hat{v}|}{I_{lim} \sqrt{\sigma_{vi}^2 + 1} (I_{lim} - I_{th})}. \end{aligned}$$

特点:

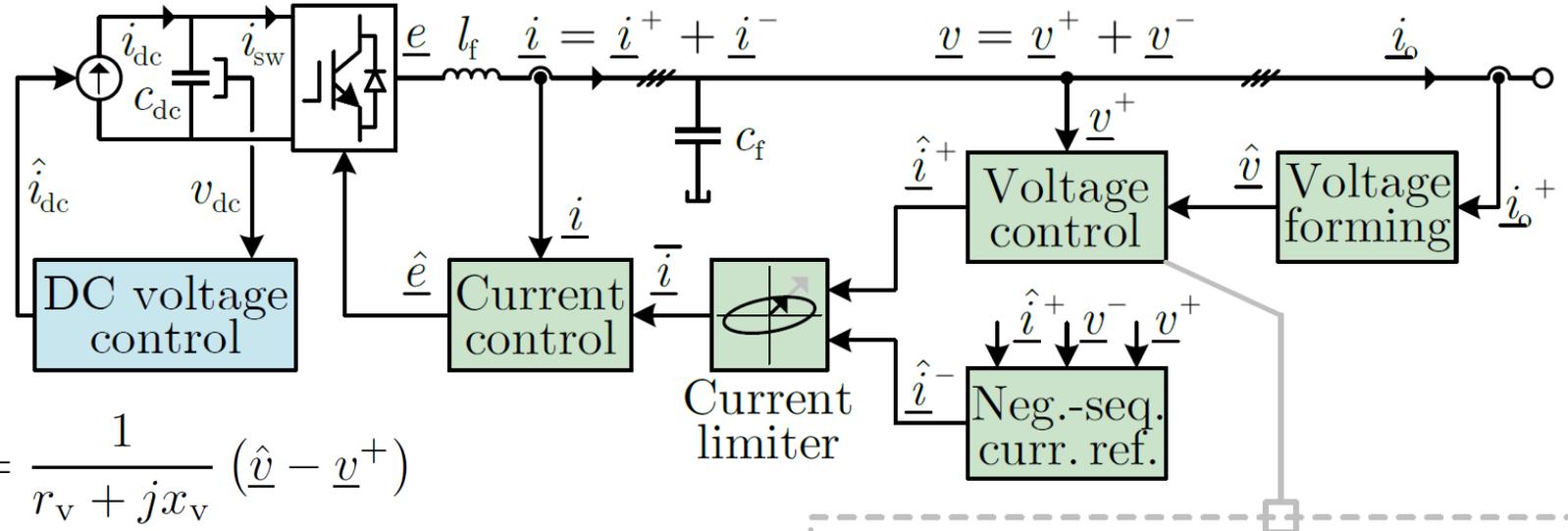
- 参数整定保守
- 无法充分利用过流能力
- 响应受到内环限制, 需结合限幅器使用



构网限流方法 (2) : 虚拟导纳限流

原理:

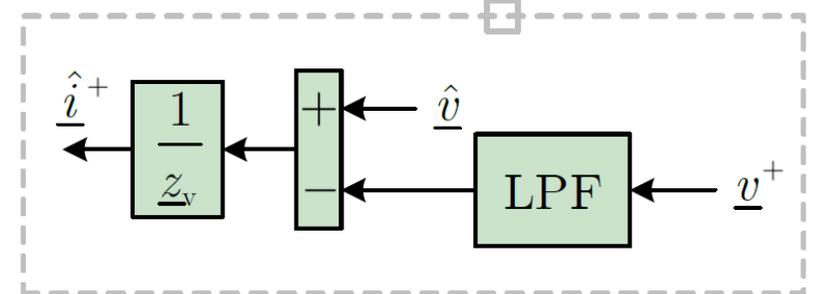
$$\underline{\hat{i}} = \begin{cases} \underline{\hat{i}}, & |\underline{\hat{i}}| \leq I_{\text{lim}} \\ \frac{I_{\text{lim}}}{|\underline{\hat{i}}|} \underline{\hat{i}}, & |\underline{\hat{i}}| > I_{\text{lim}} \end{cases}$$



$$\underline{\hat{i}}^+ = \frac{1}{r_v + l_v s} (\underline{\hat{v}} - \underline{v}^+) \quad \text{or} \quad \underline{\hat{i}}^+ = \frac{1}{r_v + jx_v} (\underline{\hat{v}} - \underline{v}^+)$$

特点:

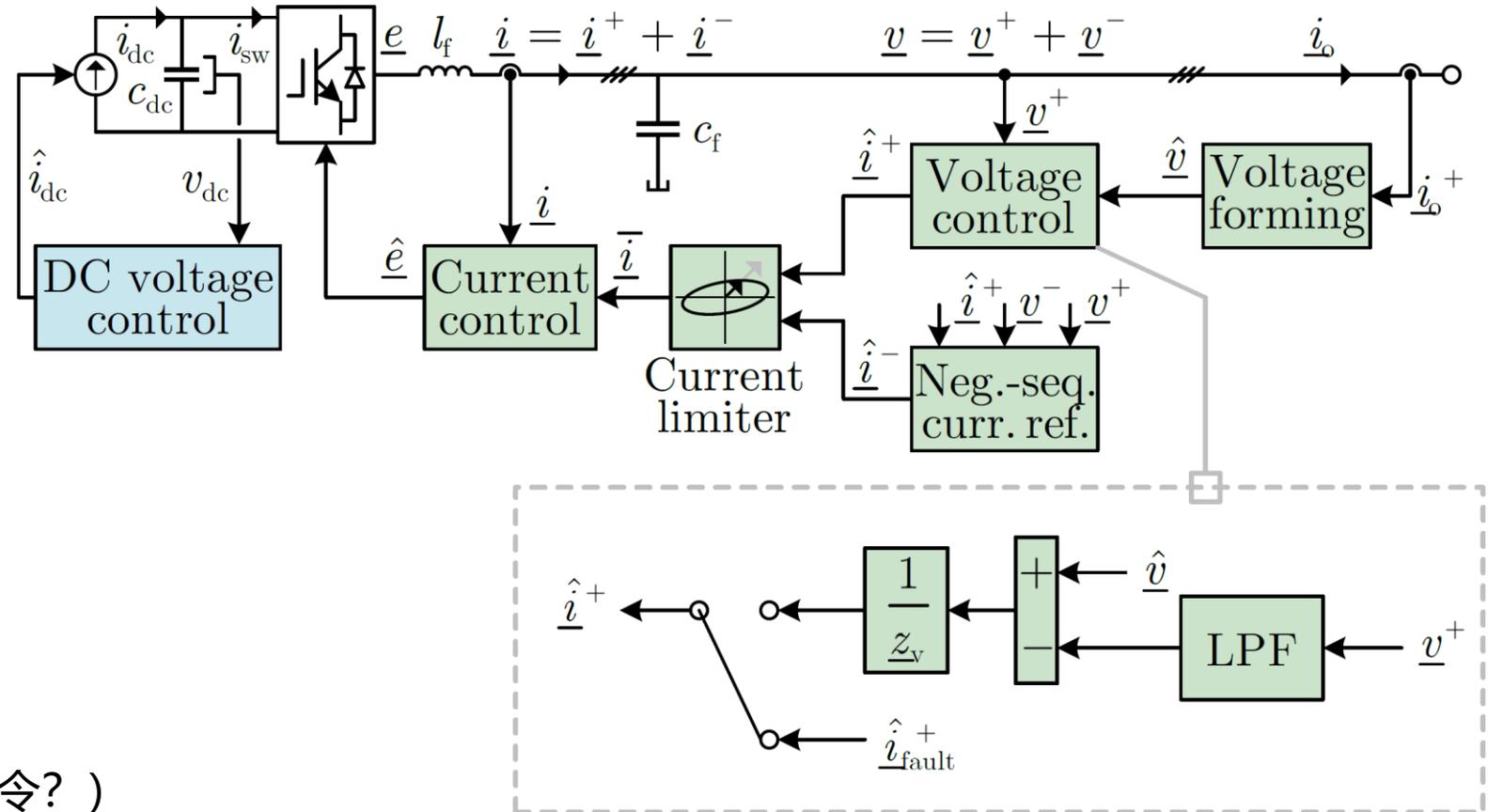
- + 实现简单, 整定容易
- + 可充分利用过流能力



构网限流方法 (3) : 饱和构流控制

原理:

- 直接给定电流指令
- 角度参考可来自于构网或者锁相
- 本质为构流控制

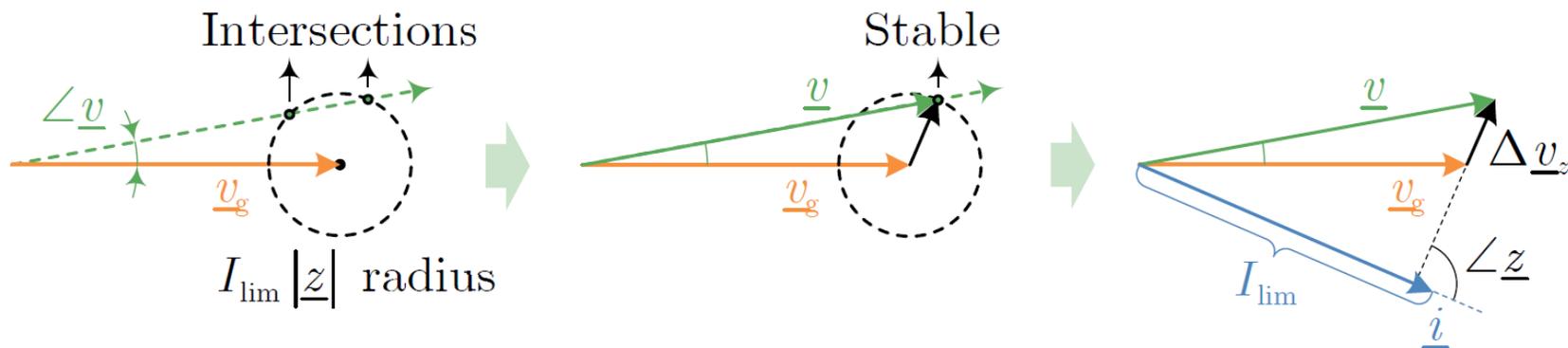
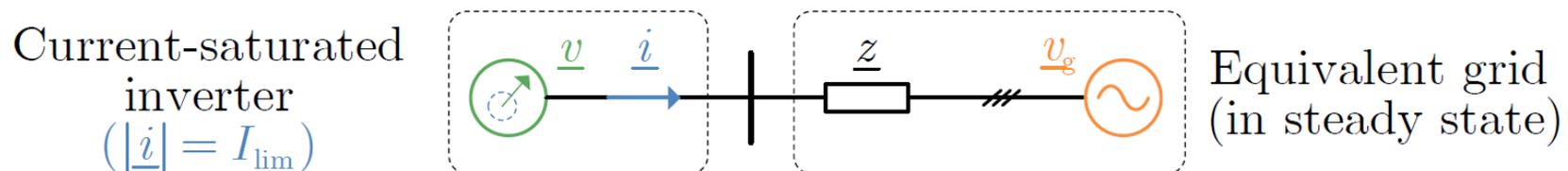


特点:

- + 可充分利用过流能力
- 涉及控制切换, 响应速度受限
- 失去构压能力 (如何给定电流指令?)

提出交叉构网控制

- 如果要求虚拟阻抗恒定（恒定的虚拟阻抗更有利于暂态稳定分析），那么如何进行控制？



- 可以控制内电势矢量的角度、输出电流的幅值
- 无法控制内电势矢量的大小、输出电流的角度

两个控制
自由度

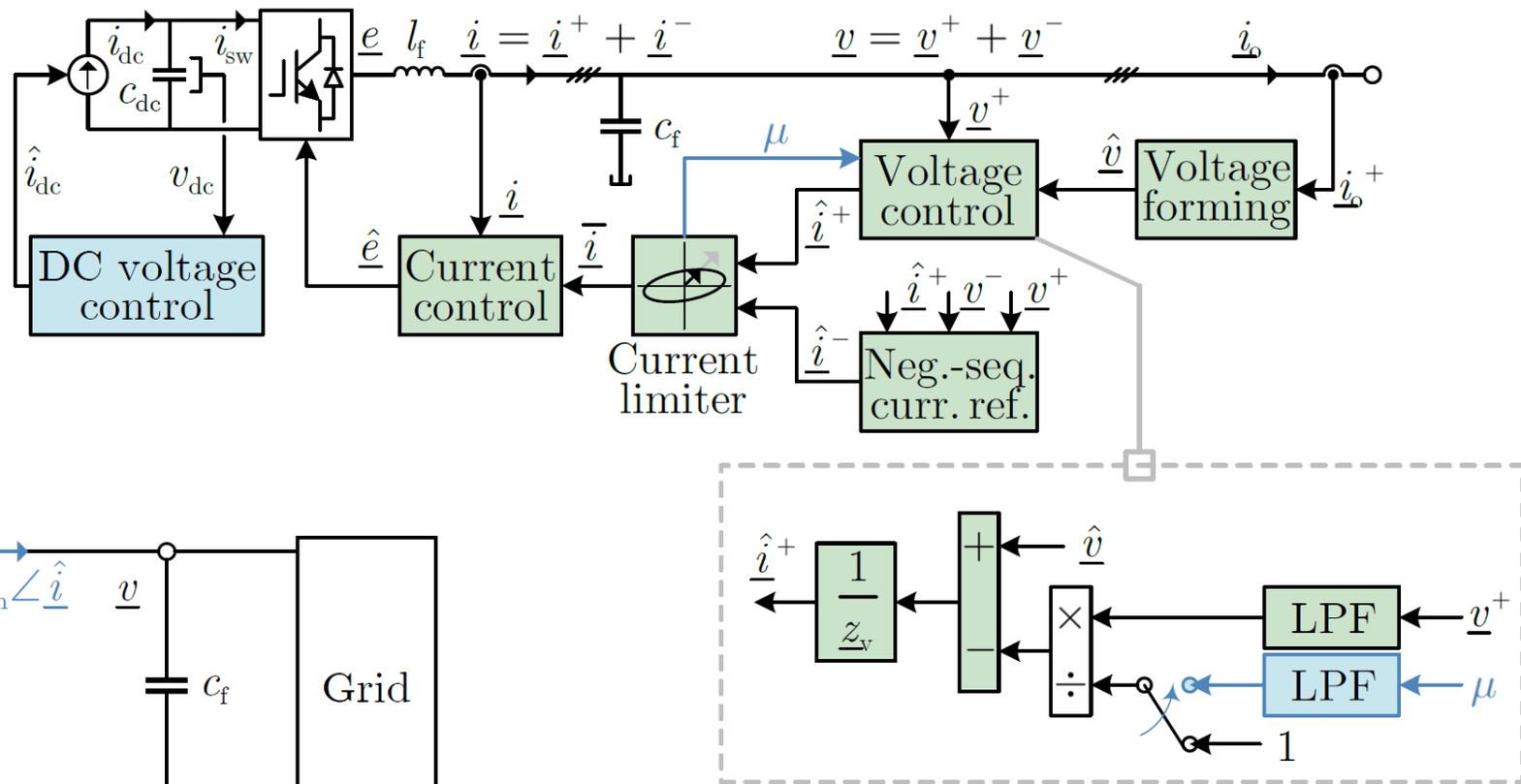
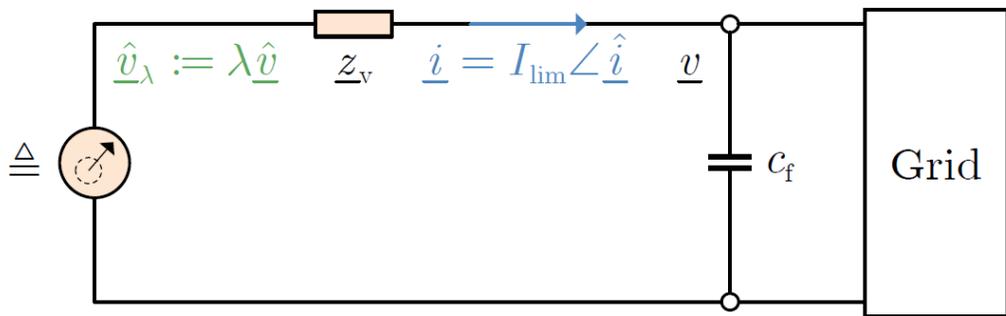
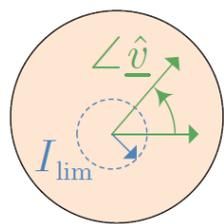
提出交叉构网控制

- 施加“饱和度”反馈 🖱️ 交叉构网

DoS (balanced): $\mu \stackrel{\text{(saturated)}}{=} \frac{I_{\text{lim}}}{|\hat{i}|}$,

$$\hat{i} = \frac{1}{z_v} \left(\kappa \hat{v} - \frac{v}{\mu} \right)$$

$$\kappa \mu \hat{v} = z_v \hat{i} + v$$



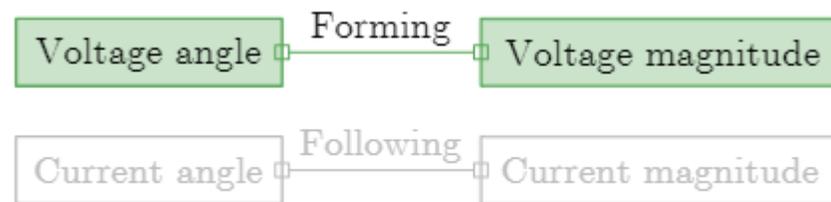
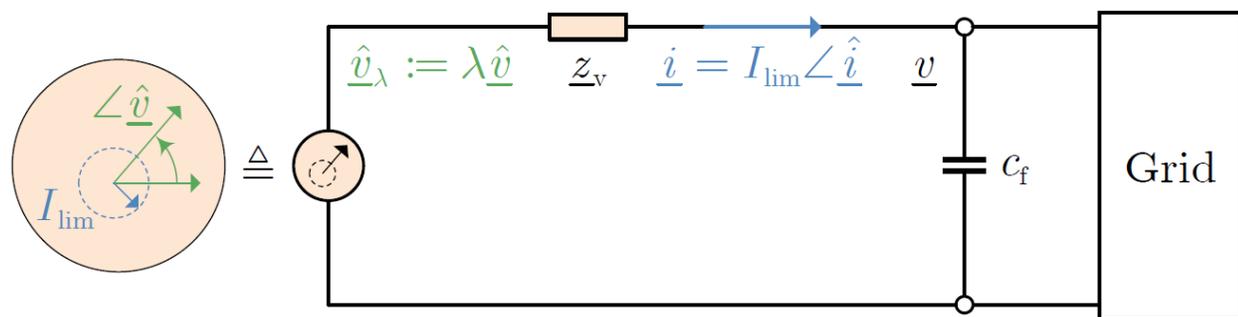
提出交叉构网控制

- 施加“饱和度”反馈 🙌 交叉构网

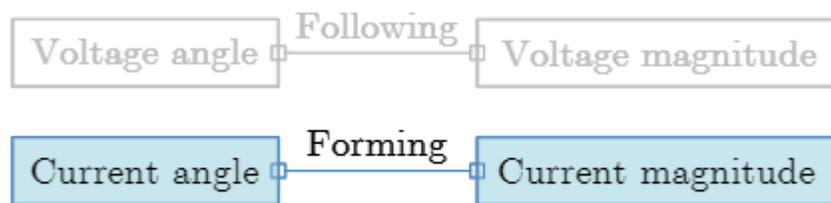
$$\text{DoS (balanced): } \mu \stackrel{\text{(saturated)}}{=} \frac{I_{\text{lim}}}{|\hat{i}|},$$

$$\hat{i} = \frac{1}{z_v} \left(\kappa \hat{v} - \frac{v}{\mu} \right)$$

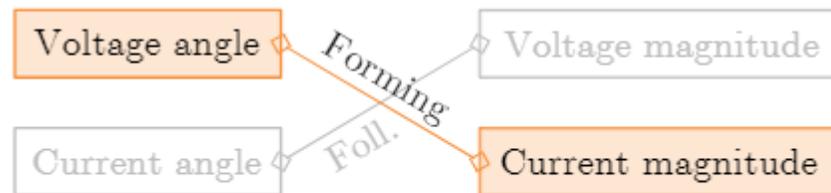
$$\kappa \mu \hat{v} = z_v \hat{i} + \underline{v}$$



(a) Voltage-forming mode



(b) Current-forming mode



(c) Proposed cross-forming mode

暂态稳定分析

- 等效暂态阻抗增大 (电流依赖)

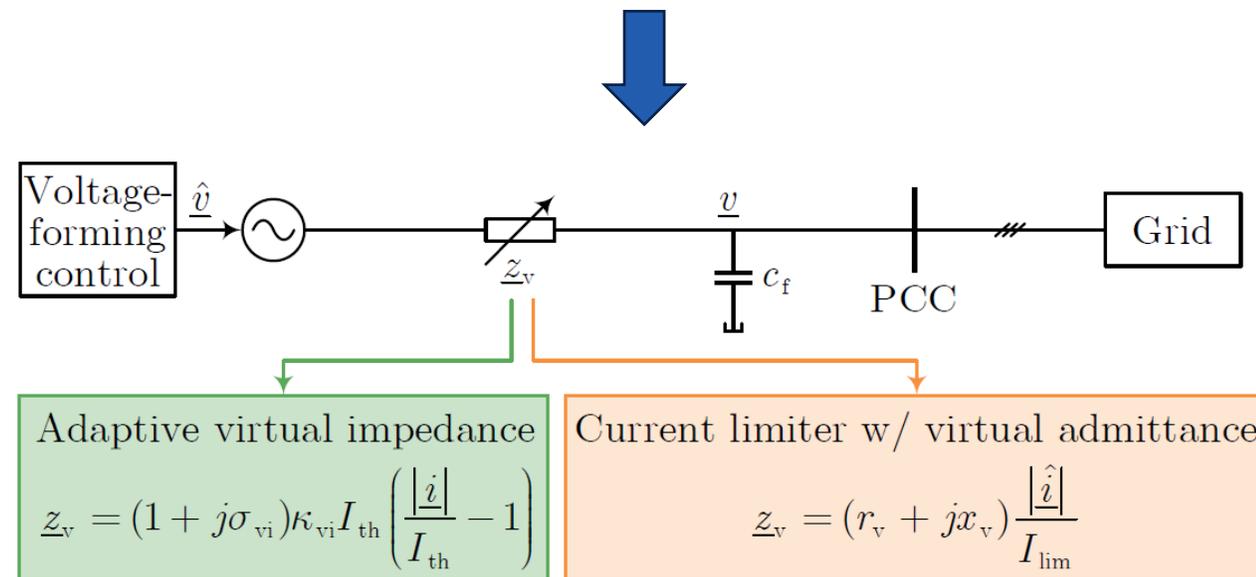
- 采用自适应阻尼阻抗控制

$$\begin{aligned} \underline{z}_v &= r_v + jx_v = (1 + j\sigma_{vi})\kappa_{vi} (|\underline{\hat{i}}| - I_{th}) \\ &= (1 + j\sigma_{vi})\kappa_{vi} I_{th} \left(\frac{|\underline{\hat{i}}|}{I_{th}} - 1 \right) \end{aligned}$$

- 采用虚拟导纳 + 限幅器控制

$$\begin{aligned} \underline{\hat{v}} - \underline{v} &= \underline{\hat{i}} (r_v + jx_v) = \frac{|\underline{\hat{i}}|}{I_{lim}} (r_v + jx_v) \underline{\hat{i}} \\ &= \underbrace{\frac{|\underline{\hat{i}}|}{I_{lim}} (r_v + jx_v)}_{\underline{z}_v} \underline{\hat{i}}, \end{aligned}$$

不同的电流限幅策略



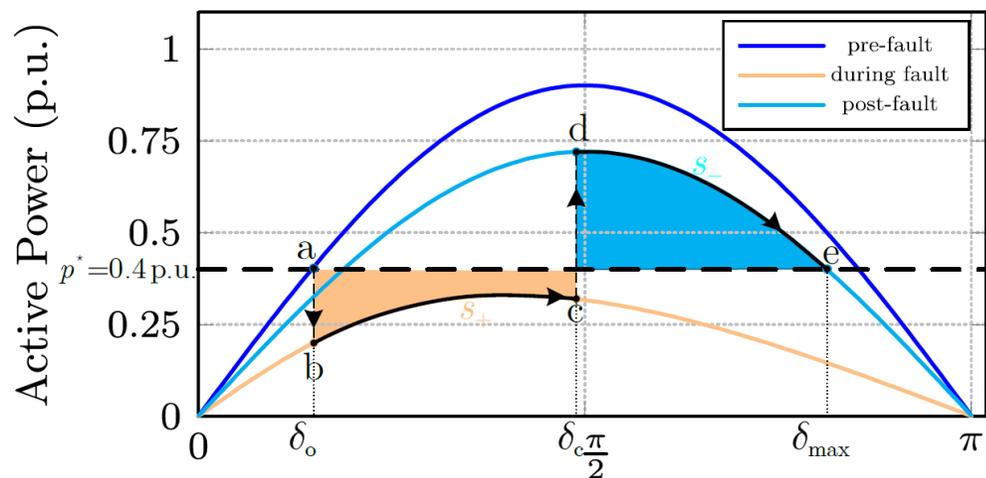
统一的等效电路

暂态稳定分析

等效功角关系

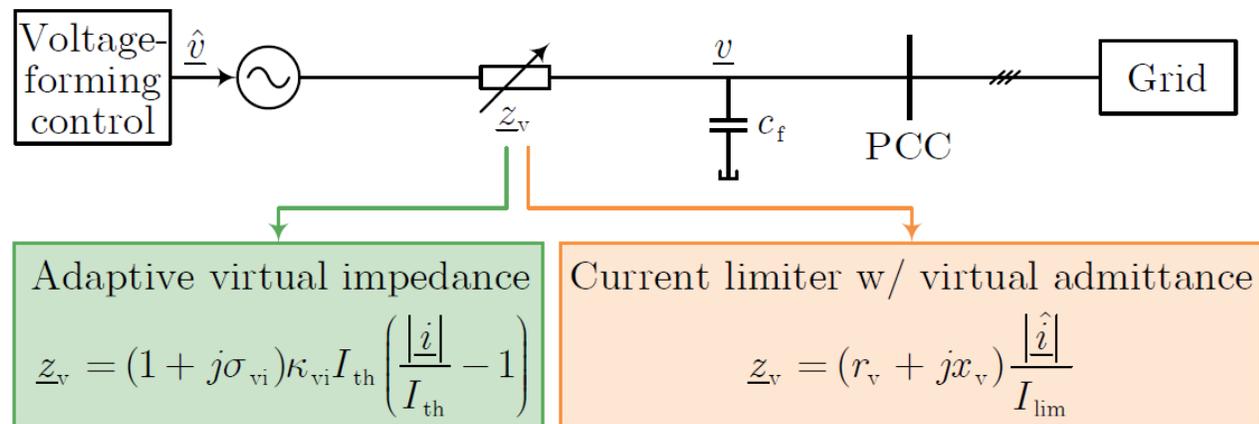
采用虚拟导纳 + 限幅器控制 (以此为例)

$$p_{VA} = \text{Re}(\hat{v} \cdot \text{conj}(\hat{i}_o)) = \frac{v_g \cdot \hat{v}}{x_v/\mu + x_g} \sin \delta$$



暂态失稳原因:

- 电压跌落导致功角曲线跌落
- 有功指令可能过高
- 故障越严重, μ 越小, 等效阻抗越大, 曲线越低



暂态稳定控制

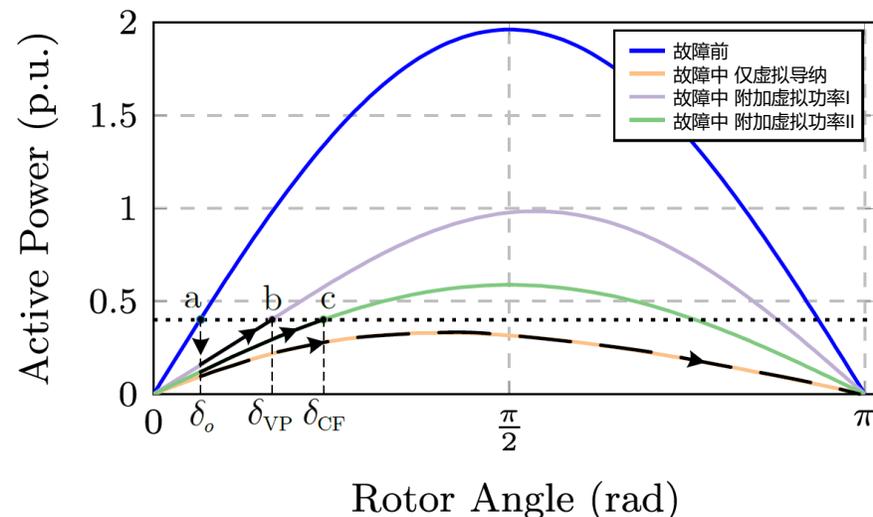
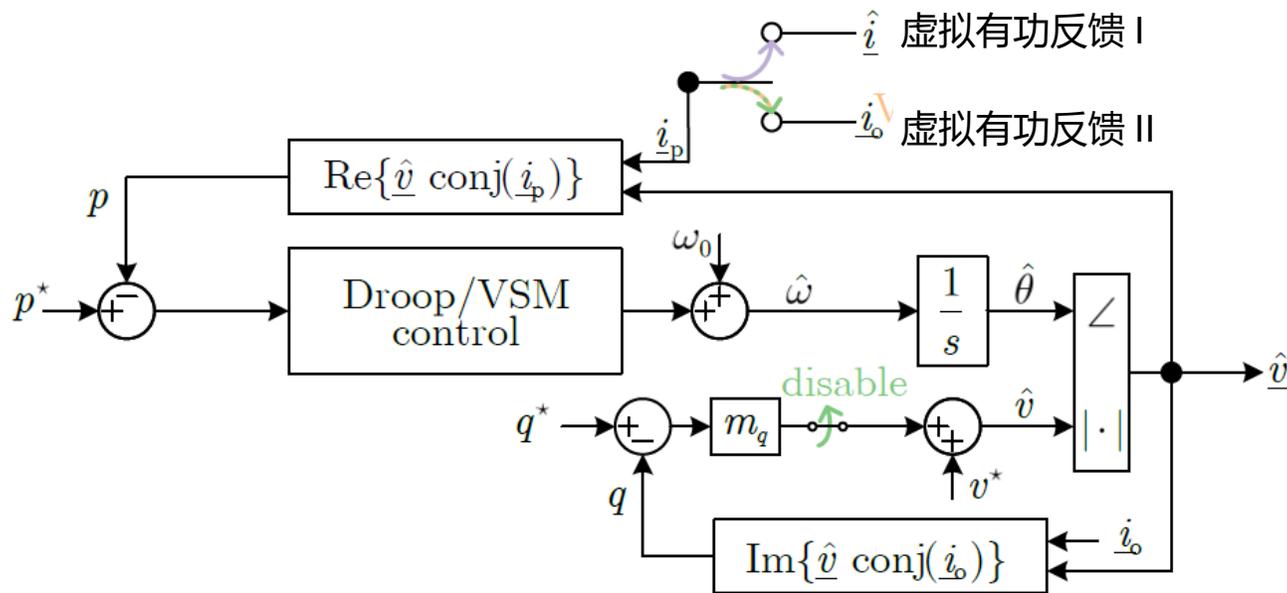
• 基于电流指令的虚拟有功反馈 I

$$p_{VP} = \operatorname{Re} \left(\hat{v} \cdot \operatorname{conj}(\hat{i}) \right) = \frac{v_g \cdot \hat{v}}{x_v + \mu \cdot x_g} \sin \delta$$

• 基于电压指令的虚拟有功反馈 II

$$\begin{aligned} p_{CF} &= \operatorname{Re} \left(\hat{v} \operatorname{conj}(\hat{i}_o) \right) \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \hat{v} \angle \hat{\theta} \operatorname{conj} \left(\frac{|\hat{v}_\mu| \angle \hat{\theta} - v_g \angle \theta_g}{jx_v + jx_g} \right) \right\} \\ &= \frac{v_g \cdot \hat{v}}{x_v + x_g} \sin \delta. \end{aligned}$$

⚠ 有功指令仍需适当降低



附：负序电流控制

- **模式I：平衡电流控制**

$$\hat{\underline{i}}^- = 0$$

- **模式II：有功二倍频振荡抑制**

$$\hat{\underline{i}}^- = -\frac{\underline{v}^-}{\text{conj}(\underline{v}^+)} \text{conj}(\hat{\underline{i}}^+)$$

- **模式III：无功二倍频振荡抑制**

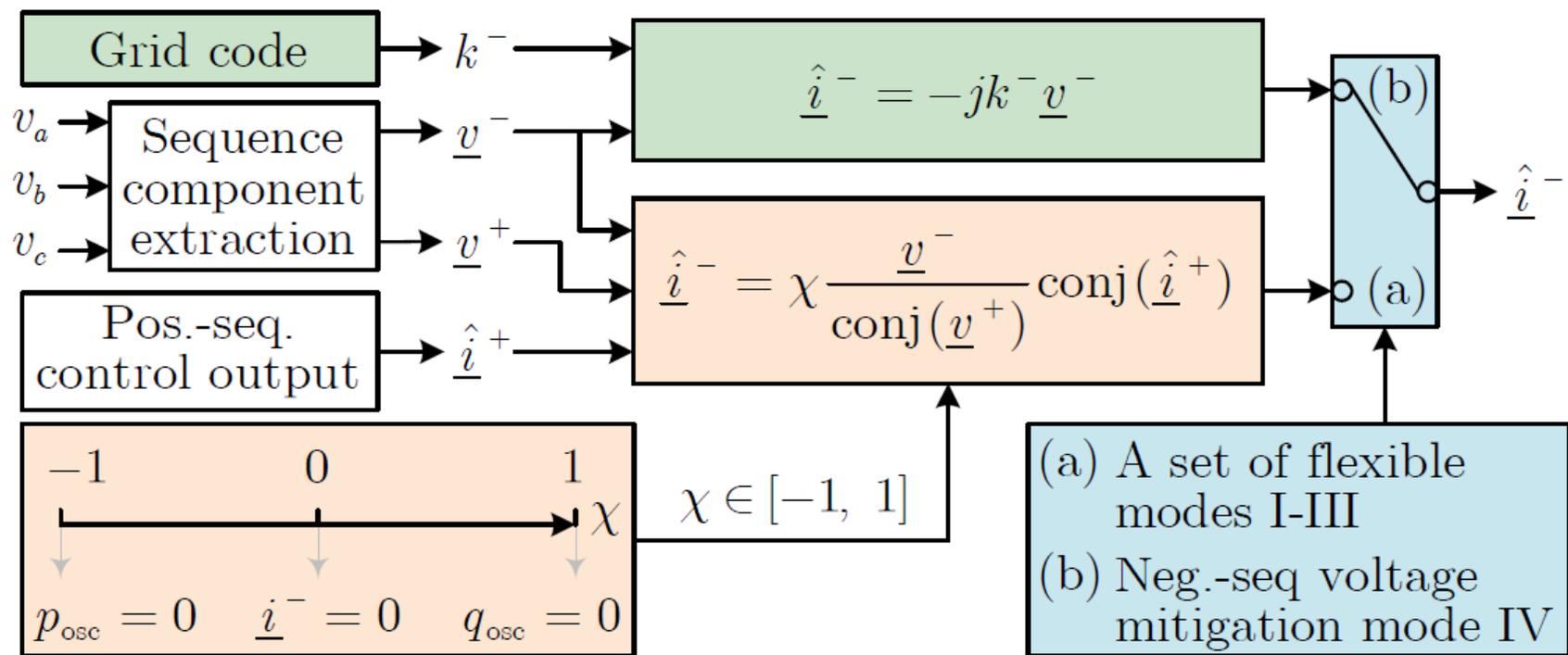
$$\hat{\underline{i}}^- = \frac{\underline{v}^-}{\text{conj}(\underline{v}^+)} \text{conj}(\hat{\underline{i}}^+)$$

- **复合模式：模式I-III的复合**

$$\hat{\underline{i}}^- = \chi \frac{\underline{v}^-}{\text{conj}(\underline{v}^+)} \text{conj}(\hat{\underline{i}}^+), \quad \chi \in [-1, 1]$$

附：负序电流控制

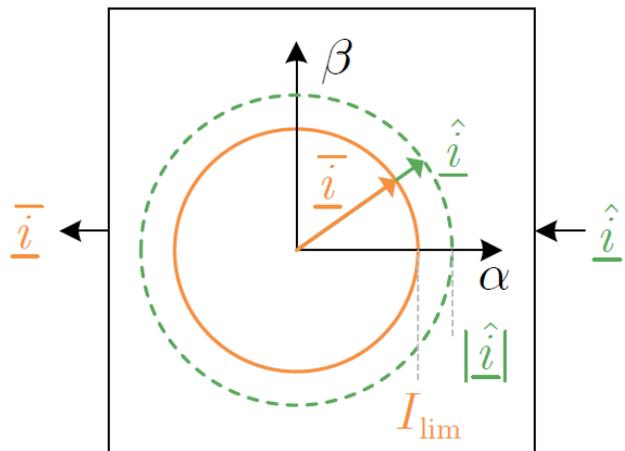
- 模式IV：负序虚拟阻抗（电压抑制） $\hat{\underline{i}}^- = -jk^- \underline{v}^-$



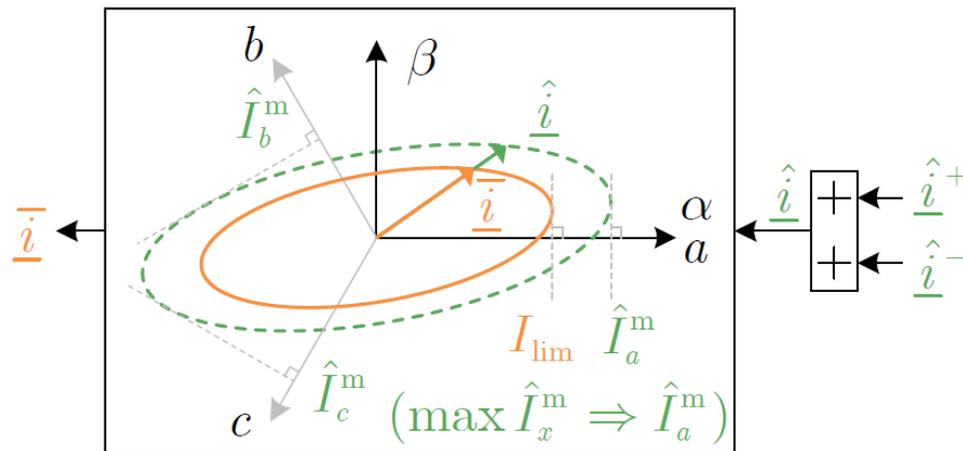
附：三相不平衡电流的限幅器

• 静止参考系下限幅器

– 平衡工况



– 非平衡工况



$$\hat{I}_x^m = \sqrt{|\hat{i}^+|^2 + |\hat{i}^-|^2 + 2 \operatorname{Re}\{\hat{i}^+ \hat{i}^- e^{j2\lambda_x}\}}$$

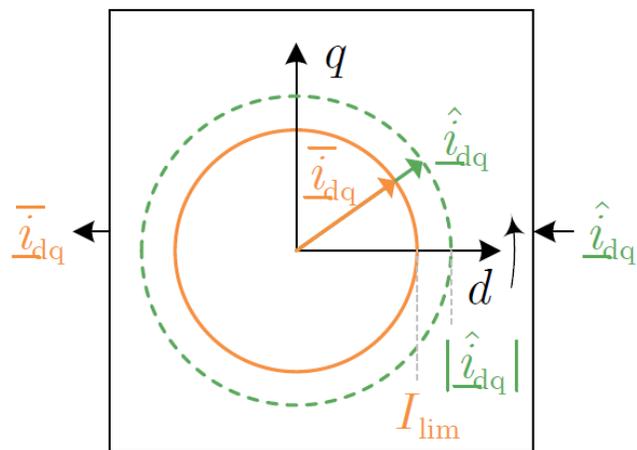
$$\hat{i} = \begin{cases} \hat{i}, & \max\{\hat{I}_a^m, \hat{I}_b^m, \hat{I}_c^m\} \leq I_{\text{lim}}, \\ \frac{I_{\text{lim}}}{\max\{\hat{I}_a^m, \hat{I}_b^m, \hat{I}_c^m\}} \hat{i}, & \max\{\hat{I}_a^m, \hat{I}_b^m, \hat{I}_c^m\} > I_{\text{lim}}. \end{cases}$$

μ

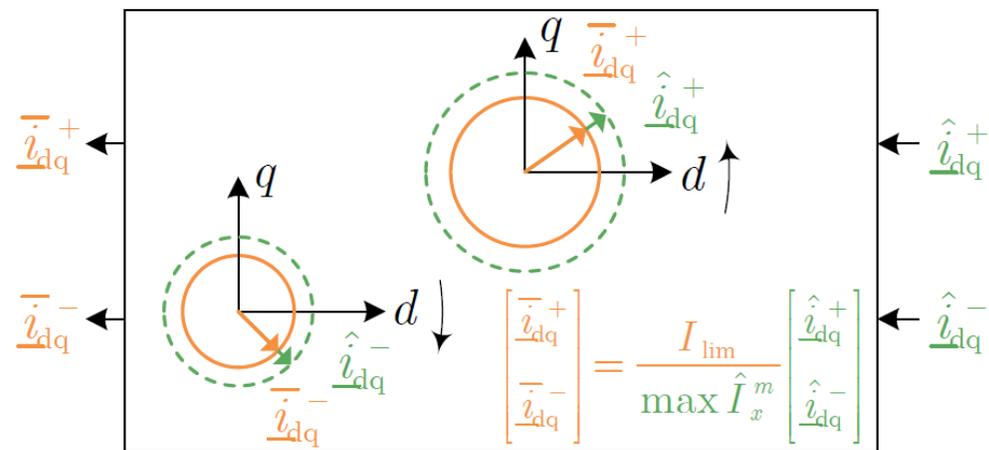
附：三相不平衡电流的限幅器

• 旋转参考系下限幅器

– 平衡工况



– 非平衡工况



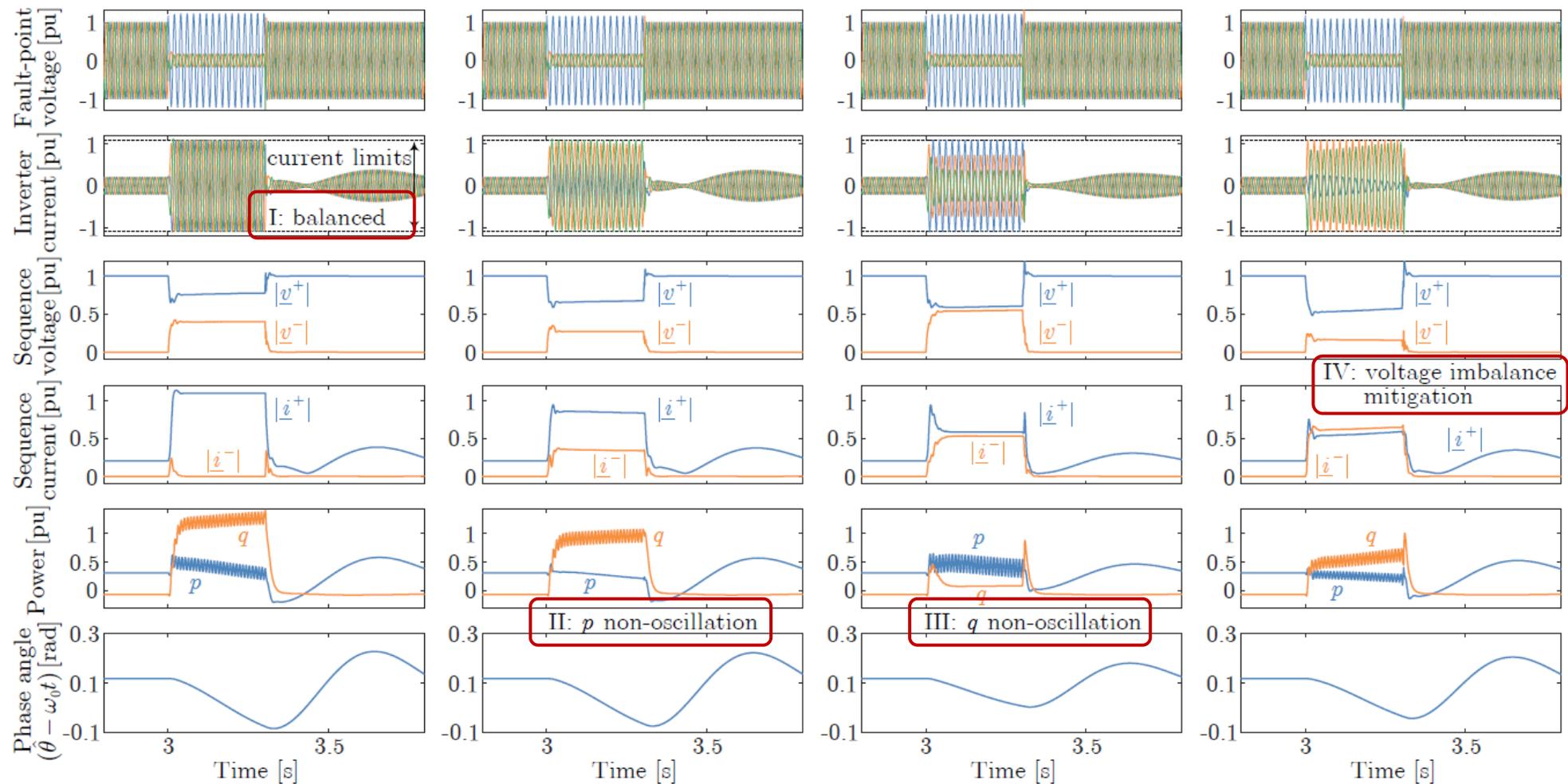
$$\hat{I}_x^m = \sqrt{|\hat{i}_{dq}^+|^2 + |\hat{i}_{dq}^-|^2 + 2 \operatorname{Re}\{\hat{i}_{dq}^+ \hat{i}_{dq}^- e^{j2\lambda_x}\}}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{\hat{i}}_{dq}^+ \\ \underline{\hat{i}}_{dq}^- \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} \hat{i}_{dq}^+ \\ \hat{i}_{dq}^- \end{bmatrix}, & \max\{\hat{I}_a^m, \hat{I}_b^m, \hat{I}_c^m\} \leq I_{lim}, \\ \frac{I_{lim}}{\max\{\hat{I}_a^m, \hat{I}_b^m, \hat{I}_c^m\}} \begin{bmatrix} \hat{i}_{dq}^+ \\ \hat{i}_{dq}^- \end{bmatrix}, & \max\{\hat{I}_a^m, \hat{I}_b^m, \hat{I}_c^m\} > I_{lim}. \end{cases}$$

μ

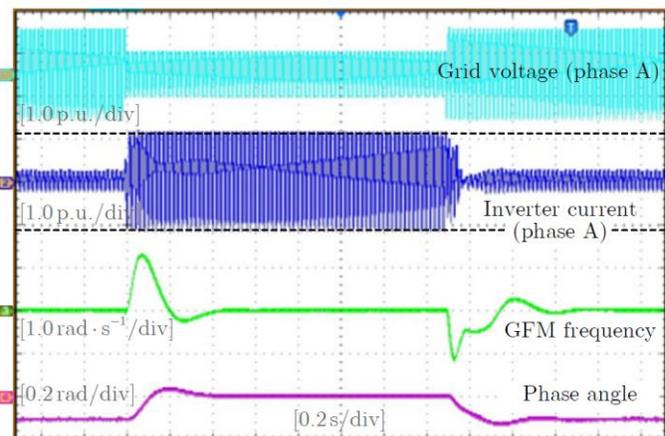
验证结果

- 交叉构网控制 | 非对称电压跌落 | 负序采用不同控制下的响应

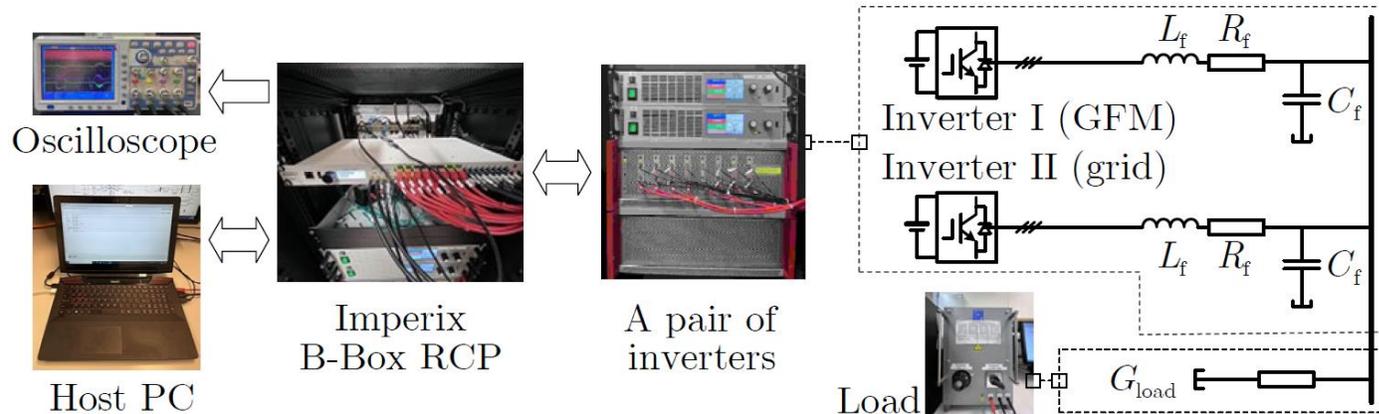


验证结果

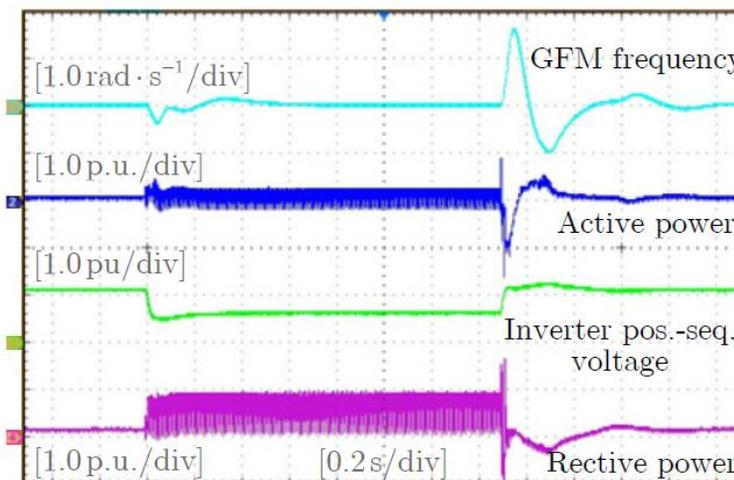
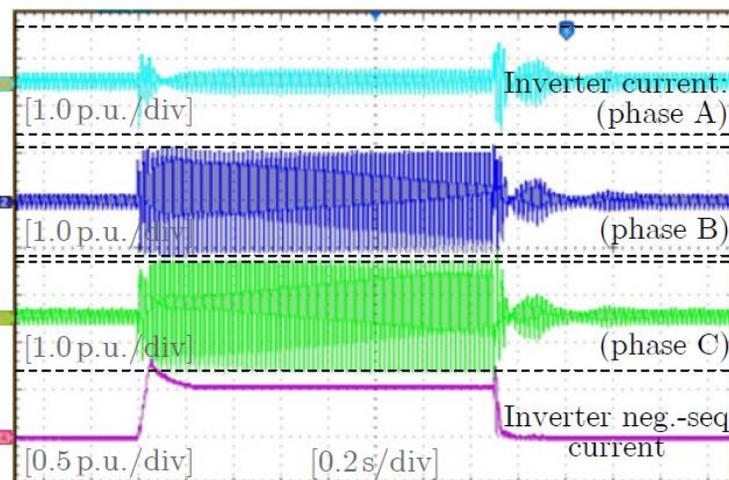
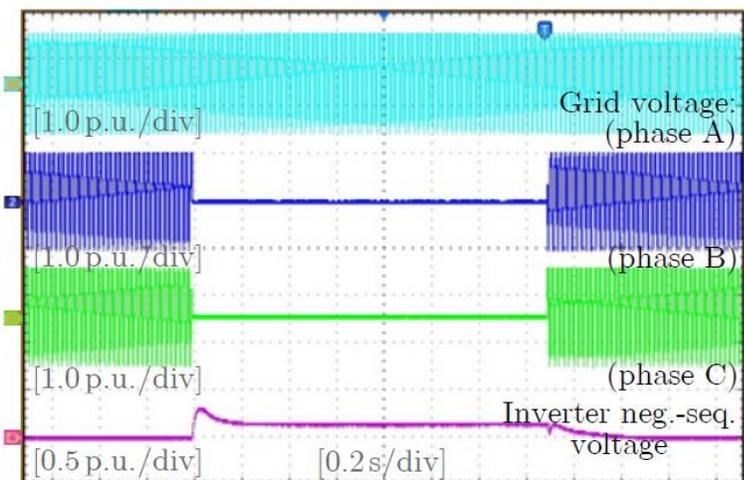
实际逆变器实验验证



对称跌落



非对称跌落

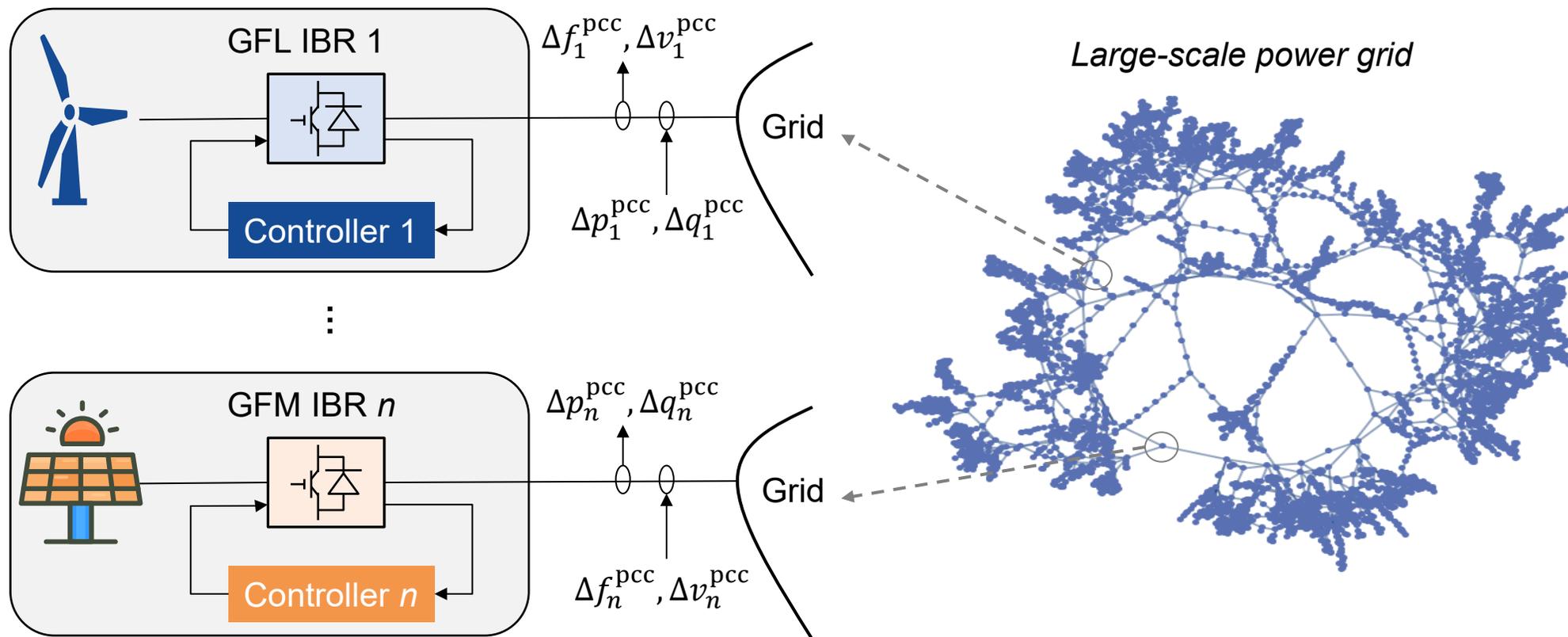


目录

- 一、非线性视角下的构网控制与稳定
- 二、暂态视角下的构网控制与稳定
- 三、分散视角下的构网稳定

海量异构新能源电力系统

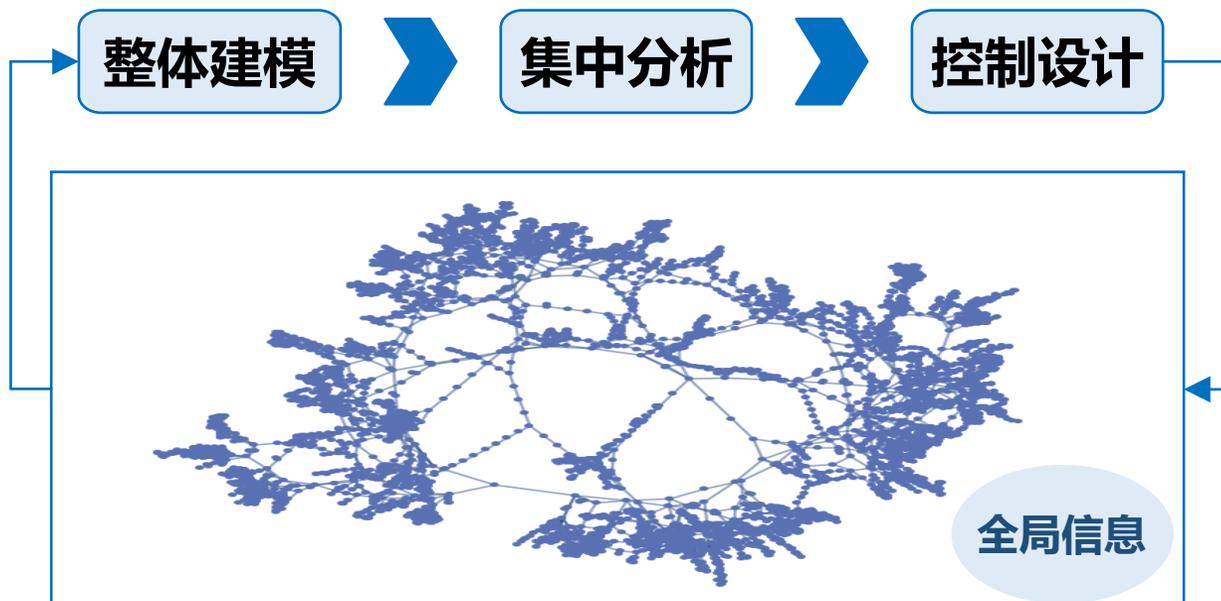
- 由多种类型装备构成的异构电力系统



集中式 vs. 分散式稳定分析框架

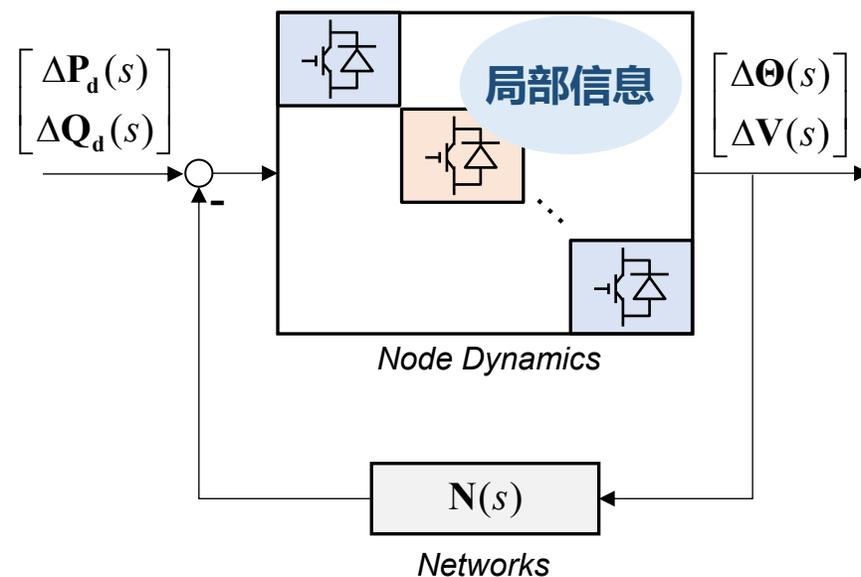
• 集中式框架

- 依赖全局信息，受到设备技术机密限制
- 系统越复杂，解析越难
- 系统规模越大，计算量越大
- + 保守性低



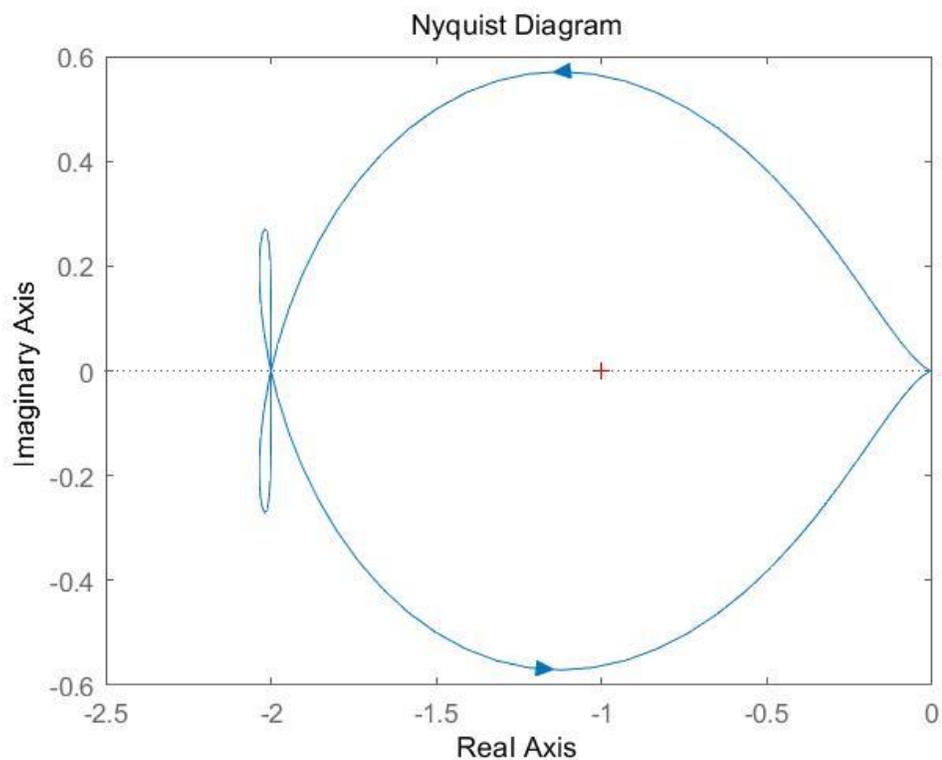
• 分散式框架

- + 依赖局部信息，免于设备技术机密限制
- + 解析分析可行
- + 计算量与规模无关
- 保守性可能高

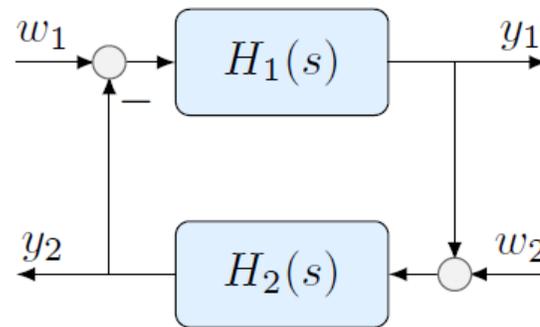


典型分散式方法 (1) : 耗散性/无源性

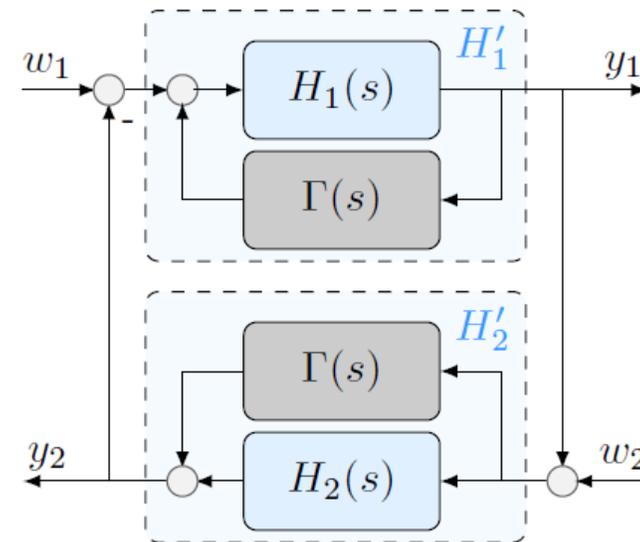
- 无源: Nyquist曲线位于右半平面



- 无源性的反馈互联 \rightarrow 稳定
 $(-90^\circ, 90^\circ) \cup (-90^\circ, 90^\circ) \subseteq (-180^\circ, 180^\circ)$



(a) Original feedback system.

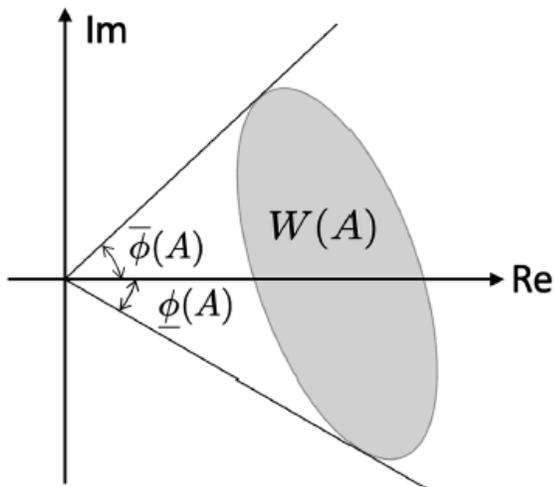


(b) Loop shifting with $\Gamma(s)$.

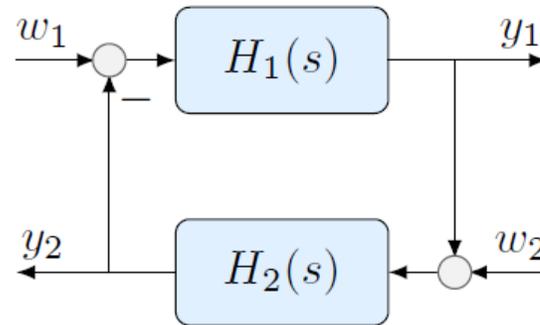
典型分散式方法 (1) : 线性无源性的推广 → 小相位

- 矩阵的相位

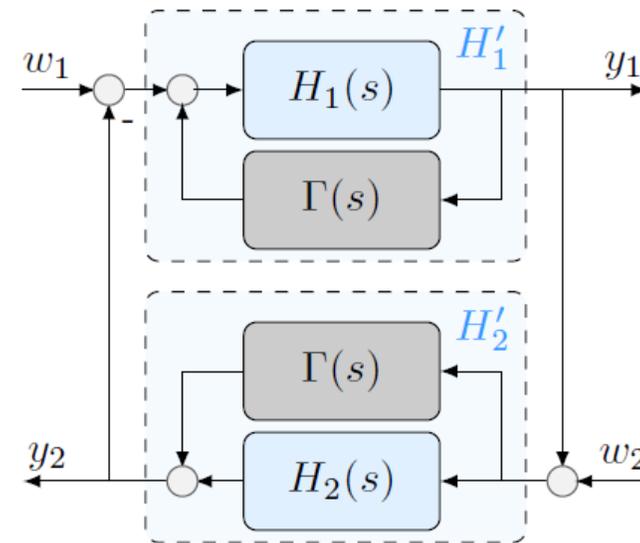
$$W(A) = \{x^*Ax : x \in \mathbb{C}^n, \|x\| = 1\},$$



- 反馈互联满足小相位 → 稳定
 $\angle H_1(j\omega) \cup \angle H_2(j\omega) \subseteq (-180^\circ, 180^\circ)$



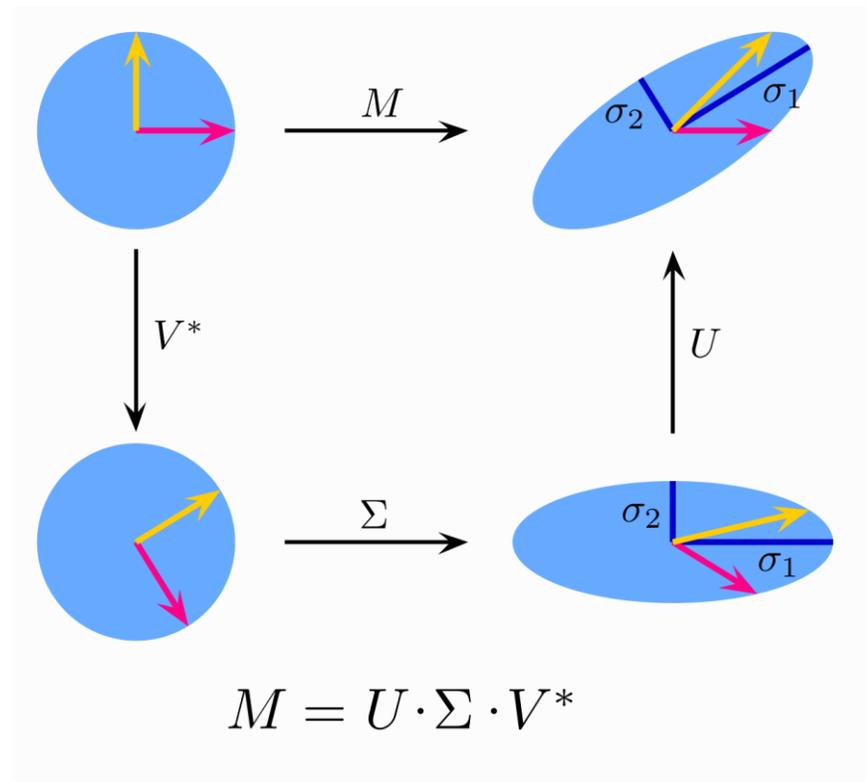
(a) Original feedback system.



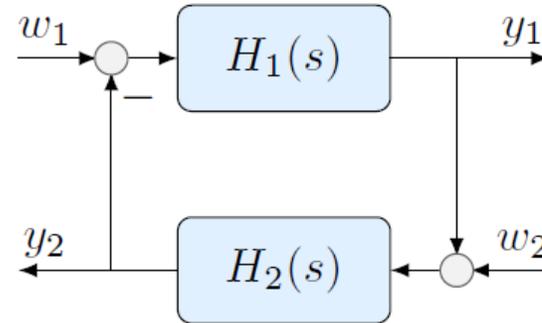
(b) Loop shifting with $\Gamma(s)$.

典型分散式方法 (2) : 小增益

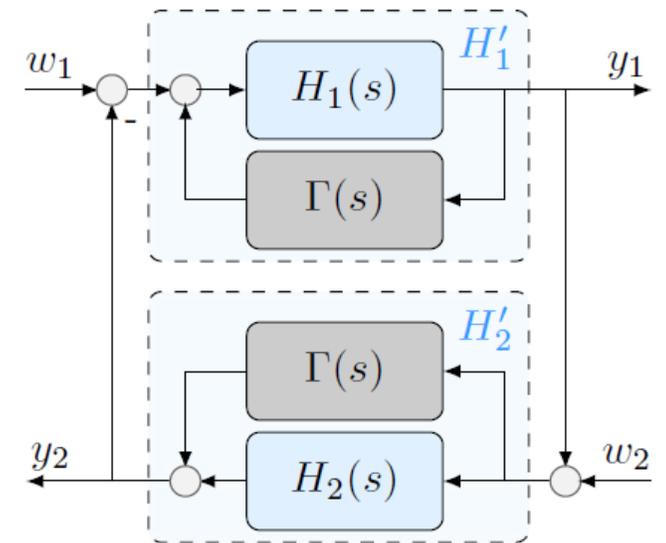
- 矩阵的增益: 奇异值



- 反馈互联满足小增益 \rightarrow 稳定
 $\|H_1(j\omega)\| \cdot \|H_2(j\omega)\| < 1$



(a) Original feedback system.



(b) Loop shifting with $\Gamma(s)$.

典型分散式方法 (3) : 增益-相位结合

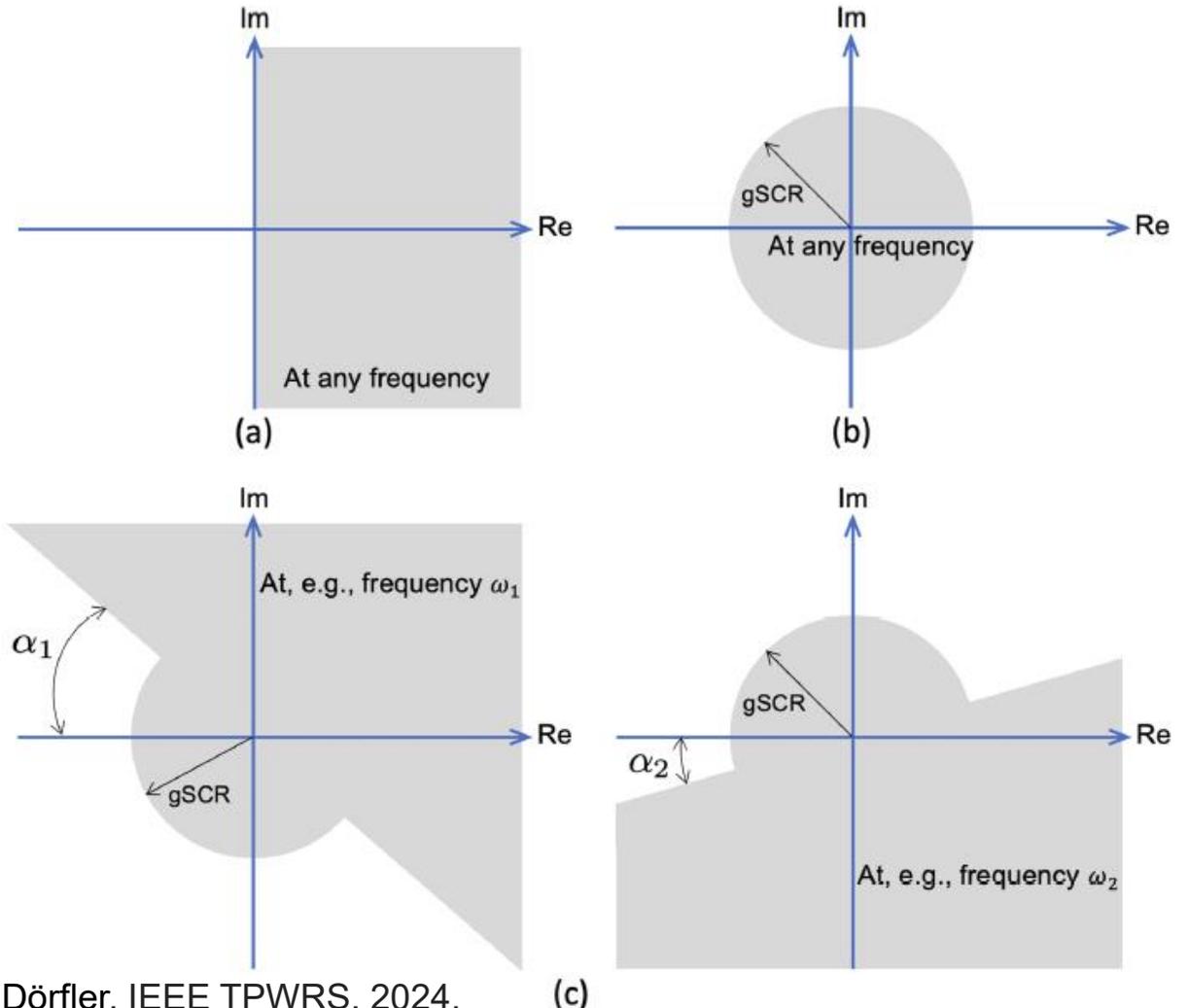
- 结合: 任意频率处, 小增益或小相位, 两者之一满足即可

- 存在统一的表示

$$Q(\omega) + S(\omega)^* H_1(j\omega) + H_1(j\omega)^* S(\omega) \geq \rho(\omega) H_1(j\omega)^* H_1(j\omega)$$

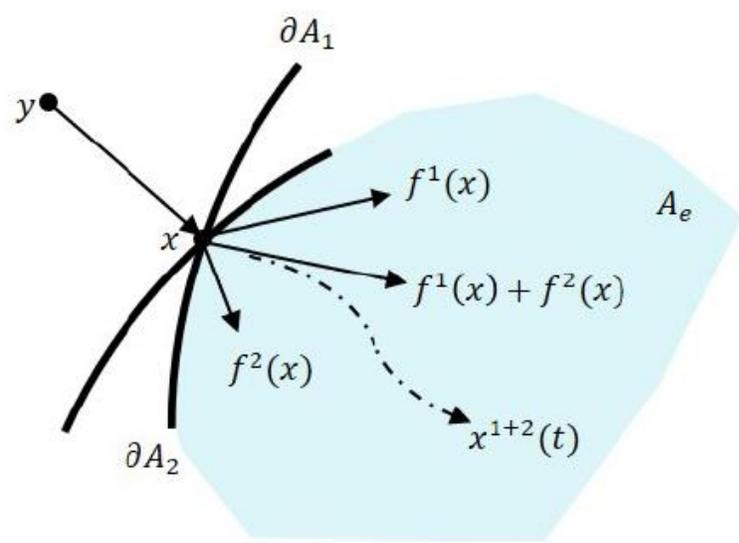
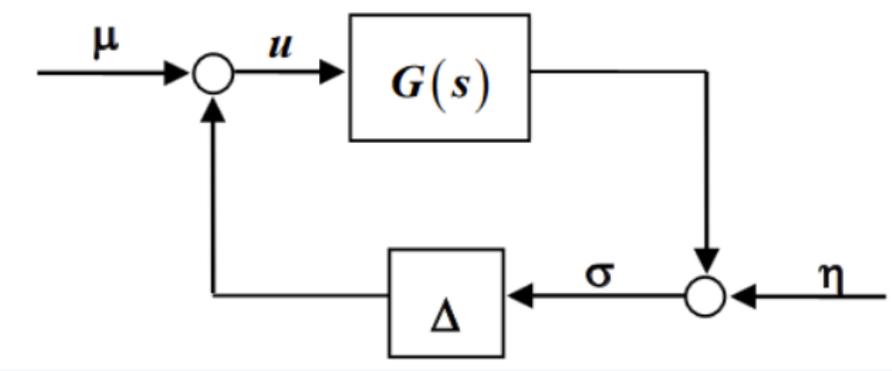
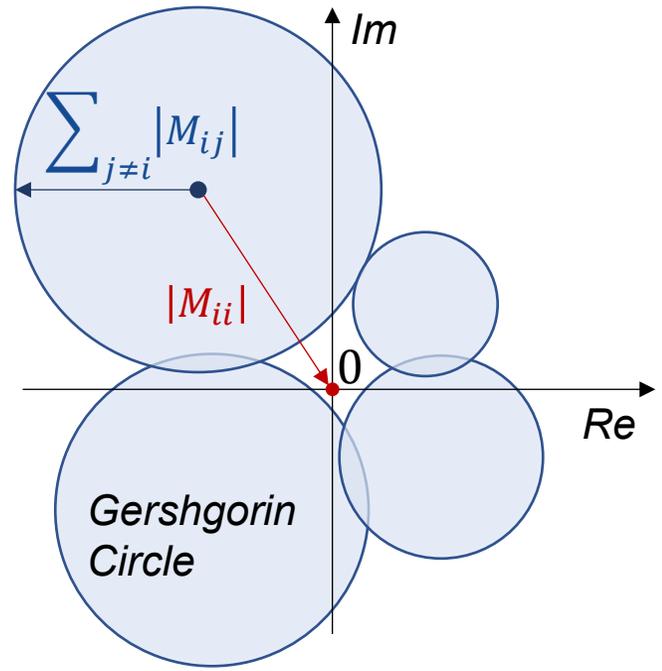
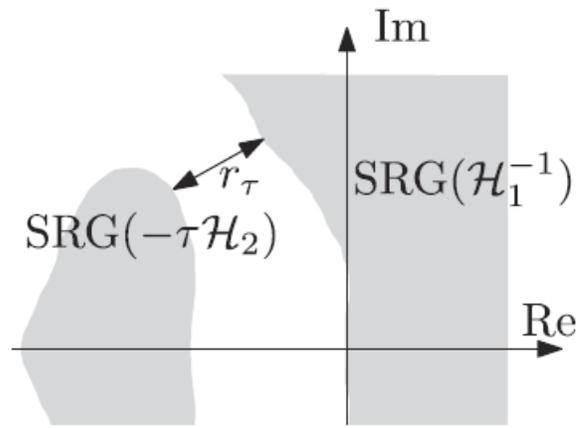
$$-G_2(j\omega)^* Q(\omega) G_2(j\omega) + S(\omega) G_2(j\omega) + G_2(j\omega)^* S(\omega)^* > \mu(\omega) I$$

$$\mu(\omega) + \rho(\omega) \geq 0$$



更多分散式方法 (4-7) :

- 比例相对图 (SRG)
- 圆盘定理 (Gershgorin Theorem)
- 积分二次约束 (IQC)
- 矢量李雅普诺夫 (Vector Lyapunov)



B.-P., Eder, A. Anta, and F. Dörfler. IEEE L-CSS, 2025.
 X. Zhu, X. He, H. Qing, H. Geng, IEEE PES Letters (submitted), 2026.
 A. Megretski and A. Rantzer. IEEE TAC, 1997.
 S.G. Nersesov and W.M. Haddad. IEEE TAC, 2006.

分散式分析方法的对比

方法	数学对象 / 判据	适用系统类型	分散式友好度	保守性	计算复杂度	可扩展性	工程可解释性	典型应用
耗散性 / 无源性	能量函数、供给率	非线性、端口互联系统	★★★★★	高	低	★★★★★	★★★★★	构网/跟网变流器、微电网
小增益定理	$\ G\ _\infty$ 、增益乘积	LTI/LTV、不确定系统	★★★★☆	很高	很低	★★★★☆	★★★★☆	模块化互联系统
SRG	频域相对图	LTI、多端口系统	★★★☆☆	中	中	★★★☆☆	★★★☆☆	阻抗法稳定性
特征值圆盘定理	特征值包含圆盘	LTI (线性化状态矩阵)	★★★★★	很高	很低	★★★★★	★★★★☆	大规模系统快速判稳
IQC	积分二次约束 + LMI	非线性、不确定、时变	★★☆☆☆	低	高	★★★☆☆	★★☆☆☆	鲁棒稳定性
向量李雅普诺夫 (VLF)	比较系统、向量 Lyapunov	大规模非线性系统	★★★★★	中-高	中-高	★★★★★	★★★★☆	分区自治电网

总结

1. **宽范围非线性稳定、故障电流、海量异构互联稳定**等是构网技术面临的重要挑战
2. **复下垂控制**是多输入多输出非线性构网控制，可实现大范围非线性稳定
3. **交叉构网控制**可保证故障限流、保持频率构网、实现暂态同步
4. **分散式稳定分析**是解决海量异构新能源电力系统的新途径



清华大学 自动化系
Department of Automation, Tsinghua University

谢谢，请批评指正！

新能源系统的构网控制与 分散式稳定分析

何秀强 助理研究员

清华大学自动化系
2026年1月30日

POWER IS NOTHING WITHOUT CONTROL

