

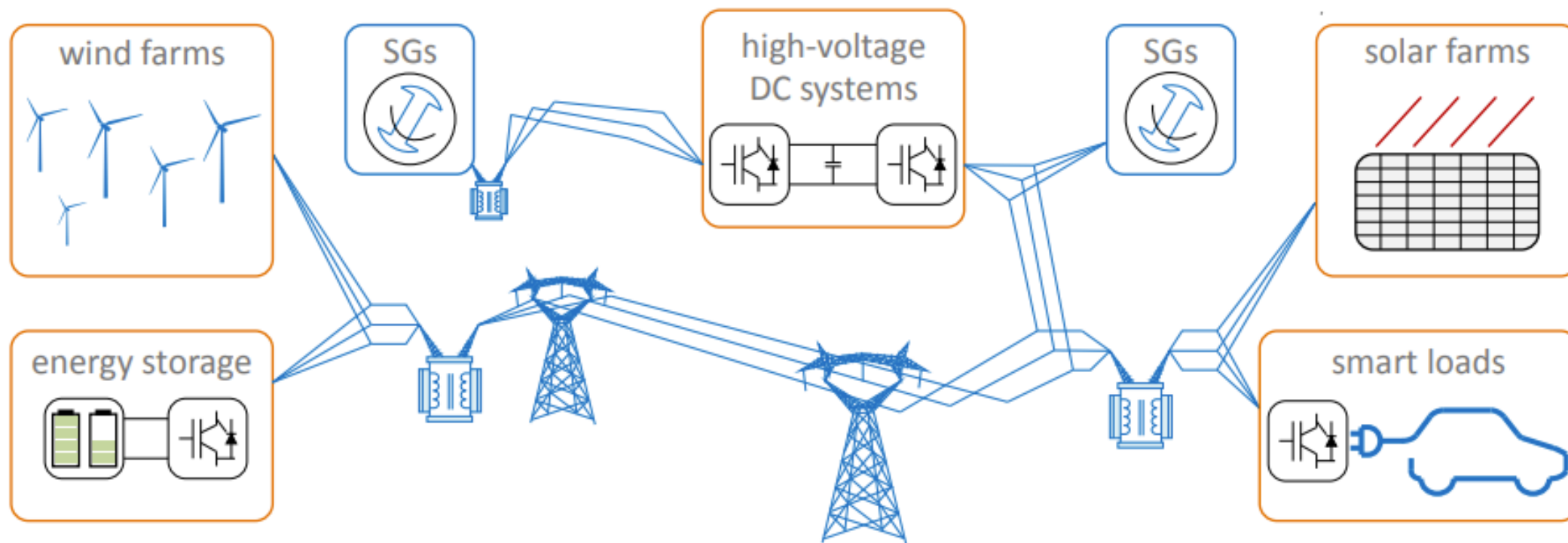
复频率构网控制

何秀强, Senior Scientist

瑞士 苏黎世联邦理工学院 (ETH Zurich)
2025年05月25日



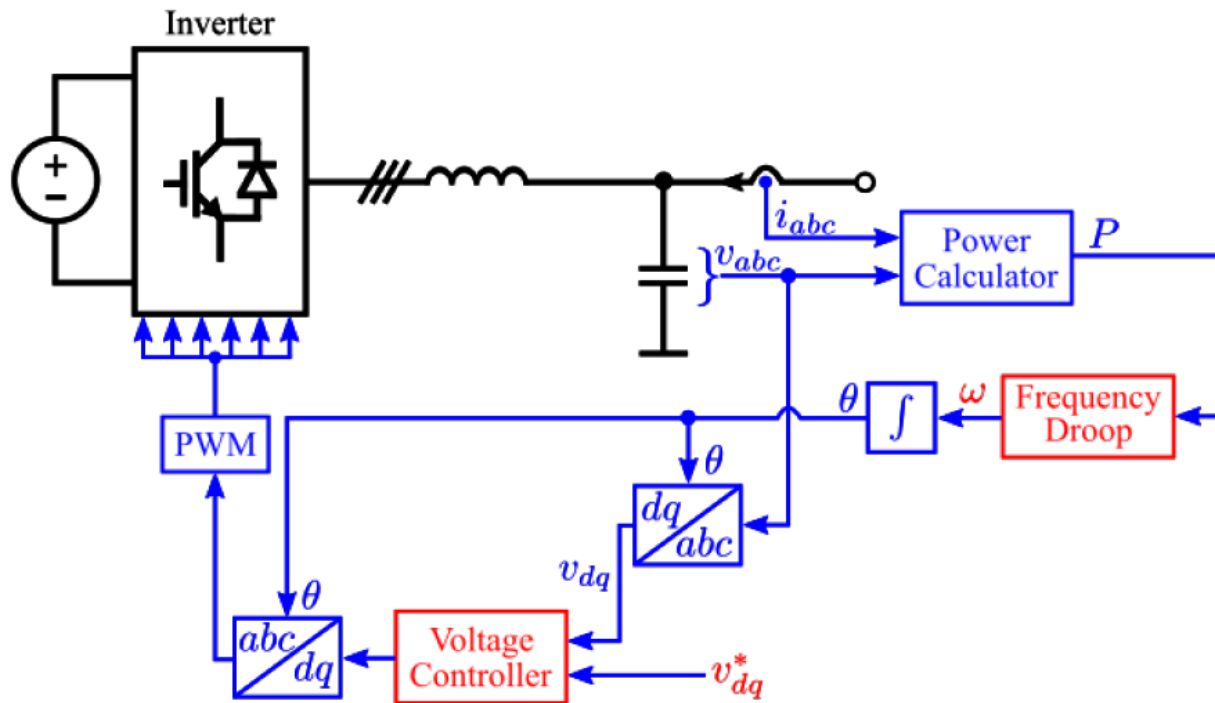
构网型电力电子装备是未来电力系统的关键组成



经典的构网控制

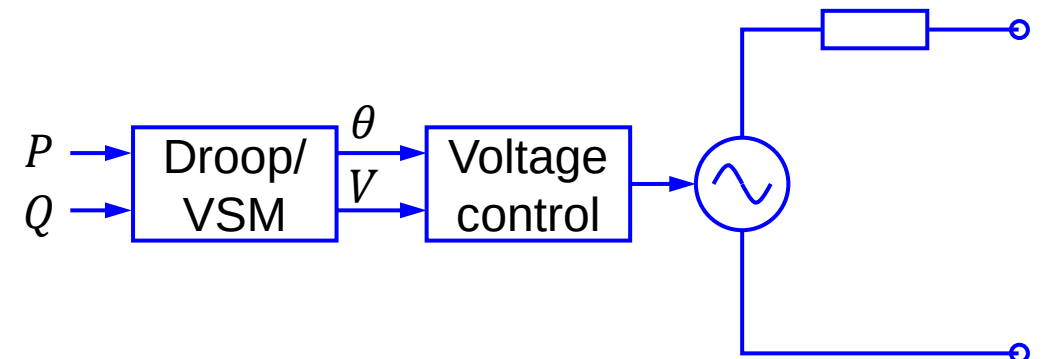
下垂控制

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



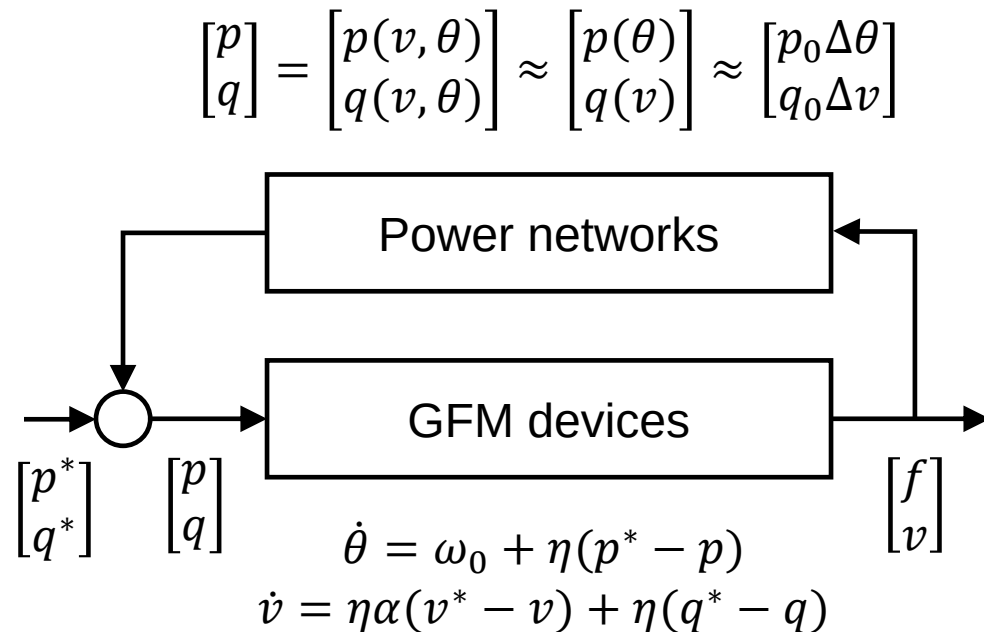
虚拟同步机 (VSM)

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



传统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:

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

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



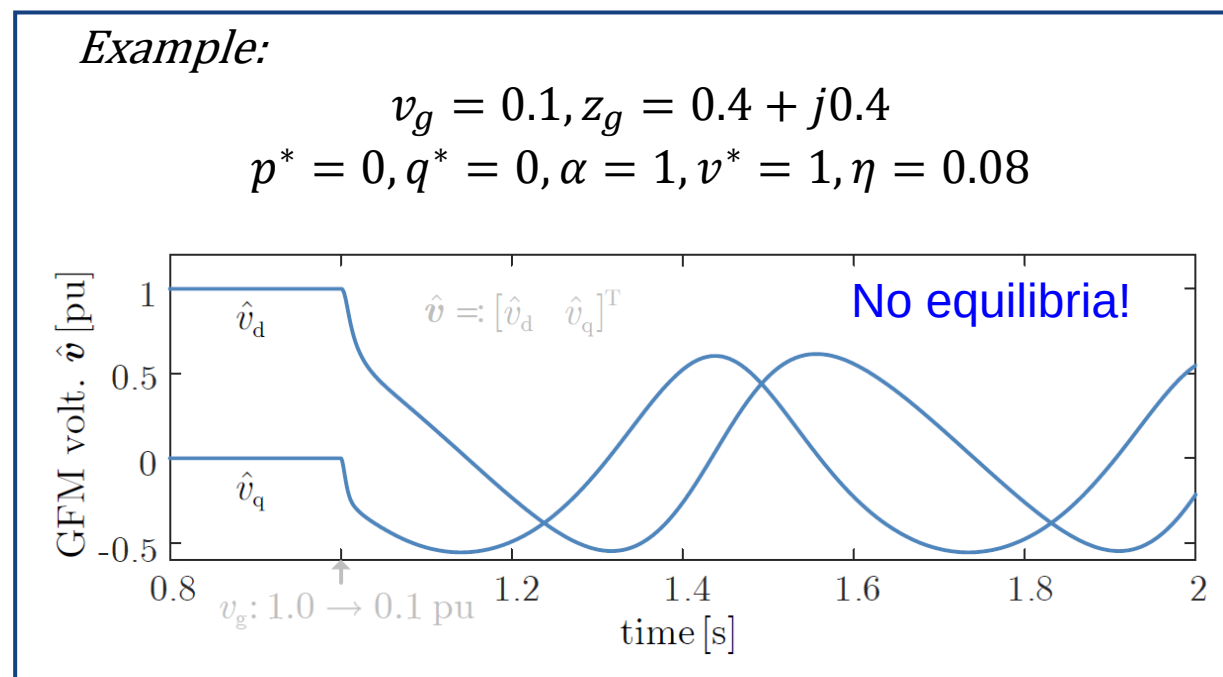
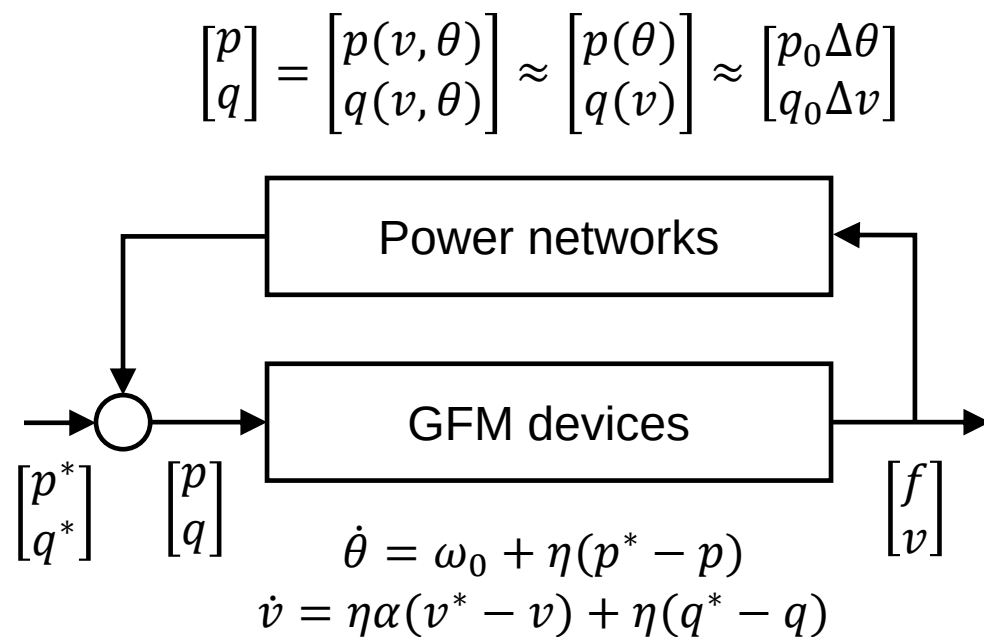
No equilibria!

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

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

传统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

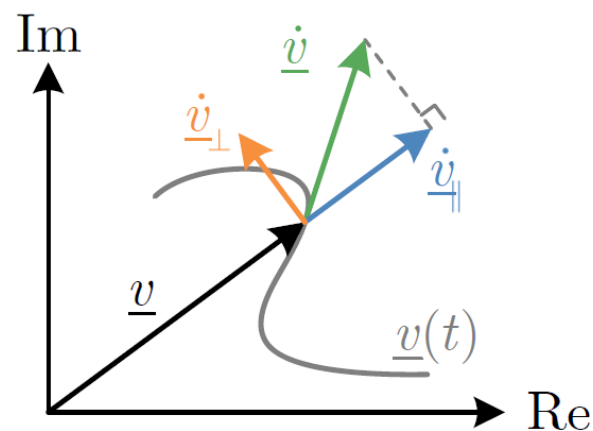
$$\underline{\vartheta} := \ln v + j\theta$$

- 复频率矢量

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

- 复功率矢量

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



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

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



电压幅值变化率

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



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
超越传统单输入单输出构网

传统下垂

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

复频率下垂

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

复频率下垂等价于可调度虚拟振荡控制 (dVOC)



Equivalent

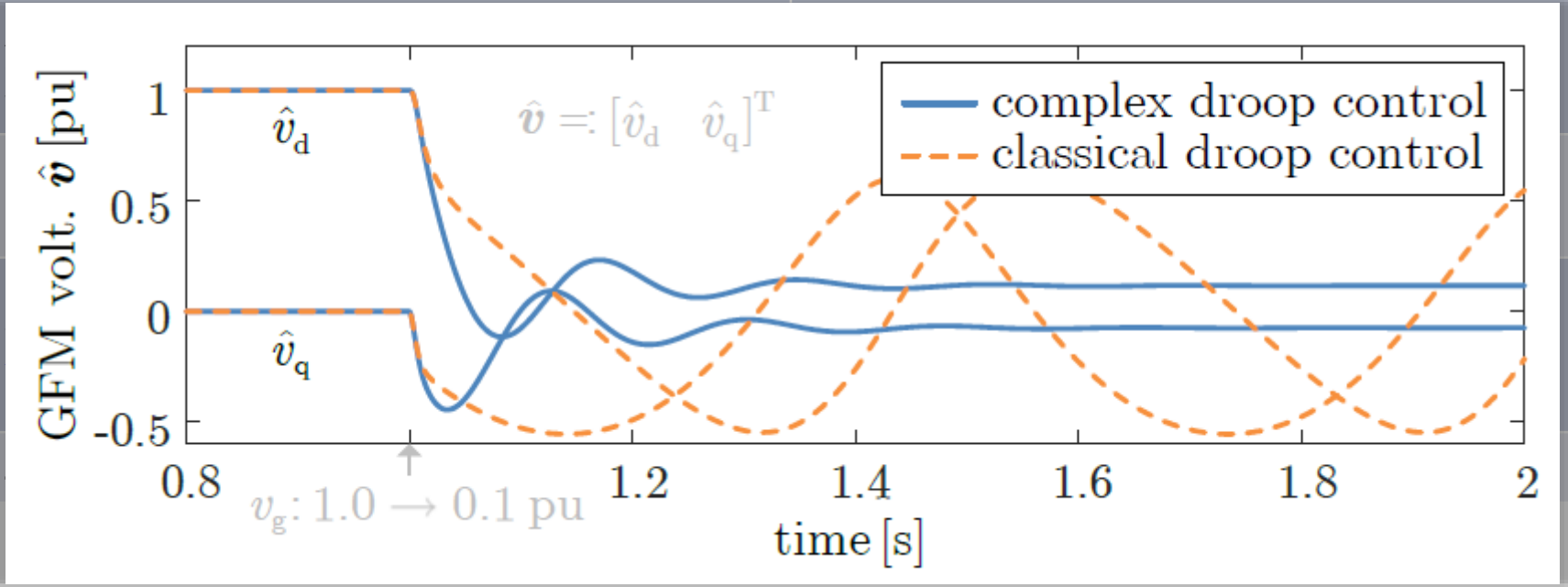
$$\underline{\dot{\vartheta}} = \frac{\dot{v}_\alpha + j\dot{v}_\beta}{v_\alpha + jv_\beta}$$

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

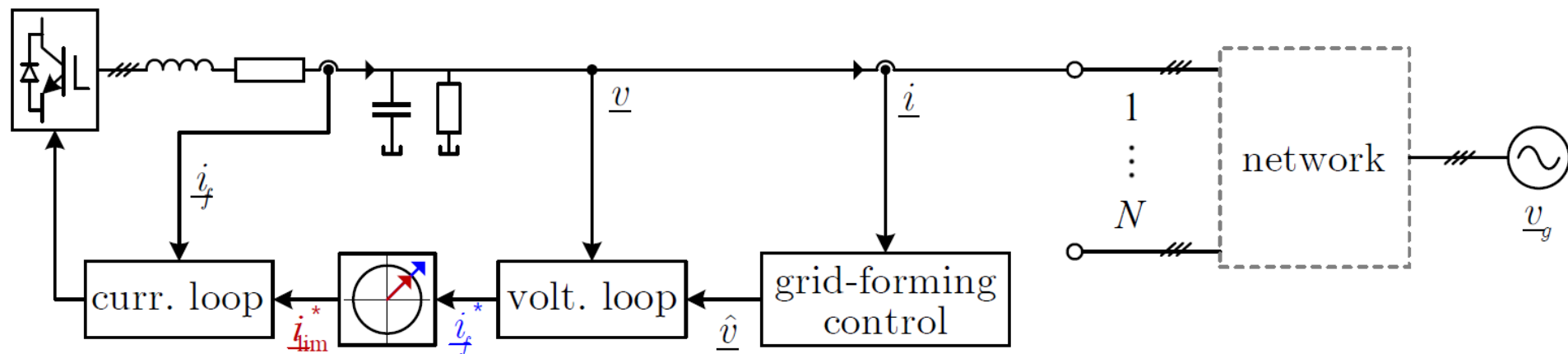
Classical droop control vs. Complex droop control

	传统下垂	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	- 标准的 v、θ 极坐标; - 标准的 p、q 功率反馈.	- 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

Classical droop control vs. Complex droop control

	传统下垂	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		

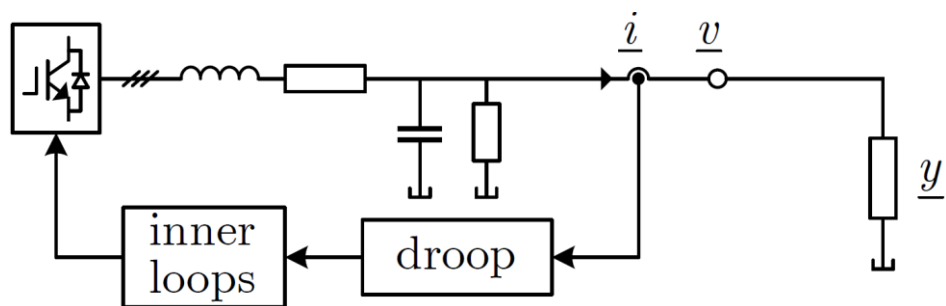
构网稳定的关键挑战



- 构网控制本身的稳定性
- 多时间动态的稳定性
- 与其他装备互联系统的稳定性
- 故障穿越电流限幅下的稳定性

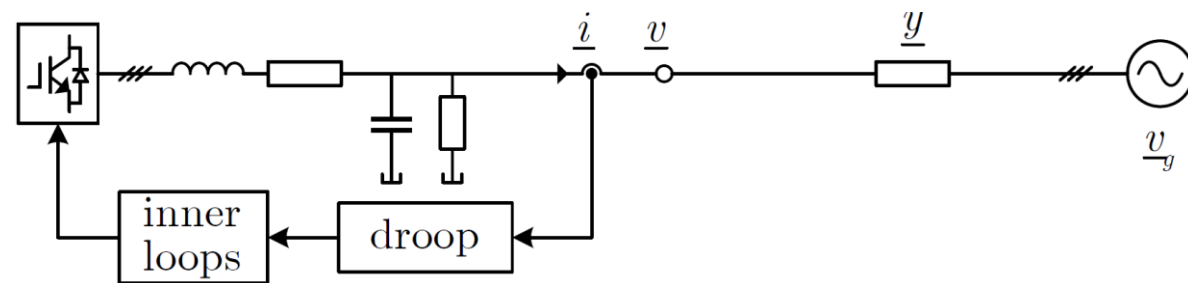
稳定性结果（1）：构网控制本身的稳定性

- 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



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

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

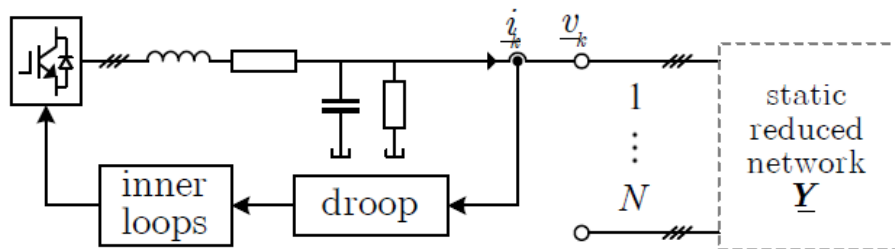


$$\dot{\mathbf{v}} = [\omega_\Delta \mathbf{J} + \eta(\mathbf{S}_\varphi^* - \mathbf{Y}_\varphi)] \mathbf{v} + \eta \mathbf{Y}_\varphi \mathbf{v}_g + \eta\alpha \Phi(\mathbf{v}) \mathbf{v}$$

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

$\downarrow$ 设定点 $\downarrow$ 控制增益 $\downarrow$ 电压稳态 $\downarrow$ 短路比

稳定性结果（1）：构网控制本身的稳定性

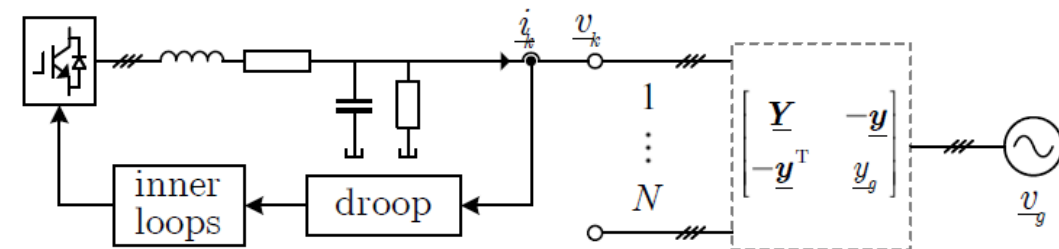


$$\dot{\underline{v}} = j\omega_0 \underline{v} + \eta e^{j\varphi} [\text{diag}(\bar{\underline{\varsigma}}_k^*) - \underline{\mathbf{Y}}] \underline{v} + \eta \alpha \text{diag}\left(\frac{v_k^* - v_k}{v_k^*}\right) \underline{v}$$

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

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

↓
网络连通度



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

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

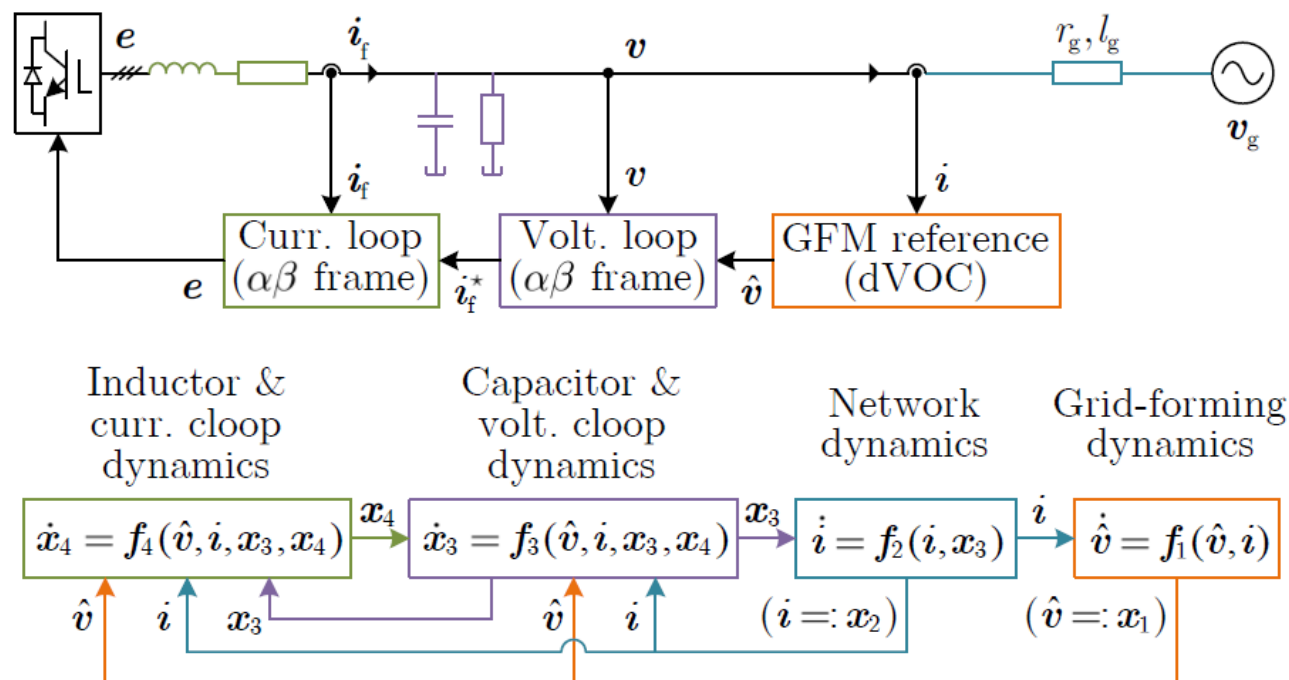
$$\max_k \text{Re}\{e^{j\varphi} \bar{\underline{\varsigma}}_k^*\} + \alpha < \frac{\alpha}{2} \frac{v_{s\min}^2}{v_{\max}^{*2}} + \lambda_1(\text{Re}\{e^{j\varphi} \underline{\mathbf{Y}}\})$$

↓
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

$$\begin{aligned} & \text{Re}\{e^{j\varphi} \frac{p^* - jq^*}{v^{*2}}\} + \alpha + c_1 < \frac{1}{2} \frac{\alpha \|v_s\|^2}{v^{*2}} + \text{Re}\{e^{j\varphi} \underline{y}\}, \\ & 0 < \eta < \frac{c_1}{\frac{l_g}{r_g} \|\mathbf{Y}\| (c_1 + c_\epsilon)}, \\ & 0 < \frac{1 + k_r^v/k_p^v}{k_r^v/c_f - 1} < \frac{4c_2}{\frac{1}{r_g} \eta (c_\epsilon^2 + 4)}, \\ & 0 < \frac{1 + k_r^c/k_p^c}{k_r^c/l_f - 1} < \frac{4c_3}{\frac{\beta_{34}}{\beta_{43}} (\tilde{\beta}_{41}^2 + \tilde{\beta}_{42}^2 + 4\tilde{\beta}_{43}^2) + c_3 \tilde{\gamma}_4}, \end{aligned}$$

时间尺度分割量化条件

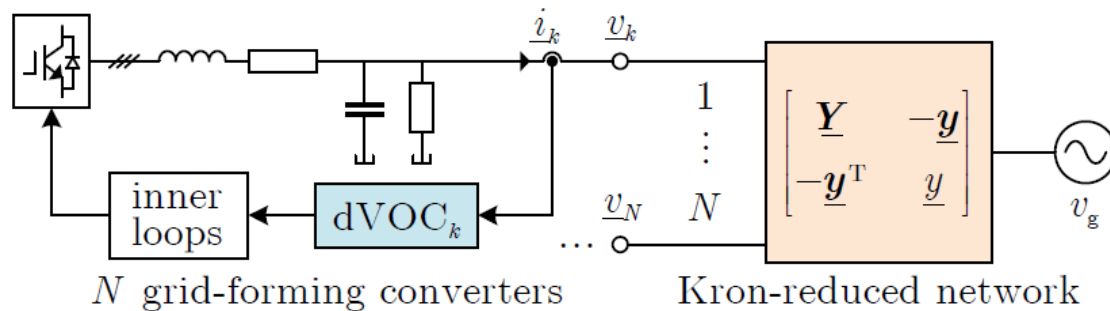
稳定性结果（3）：与其他装备互联系统的稳定性

- 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

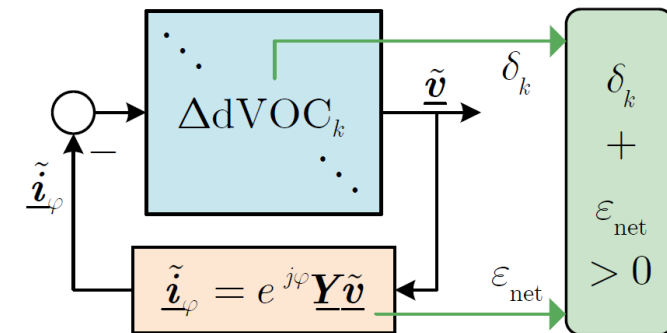
$$\delta_k := -\operatorname{Re}\left\{e^{j\varphi} \frac{p_k^* - jq_k^*}{v_k^{*2}}\right\} - \alpha_k + \alpha_k \frac{1}{2v_k^{*2}} |\underline{v}_{s,k}|^2.$$



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

↓ 网络无源性指标

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



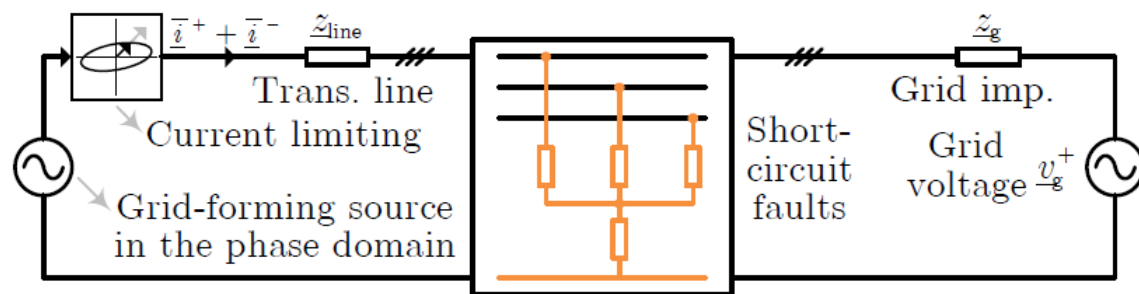
↓ 分散式稳定性条件

到目前为至，一切都好!

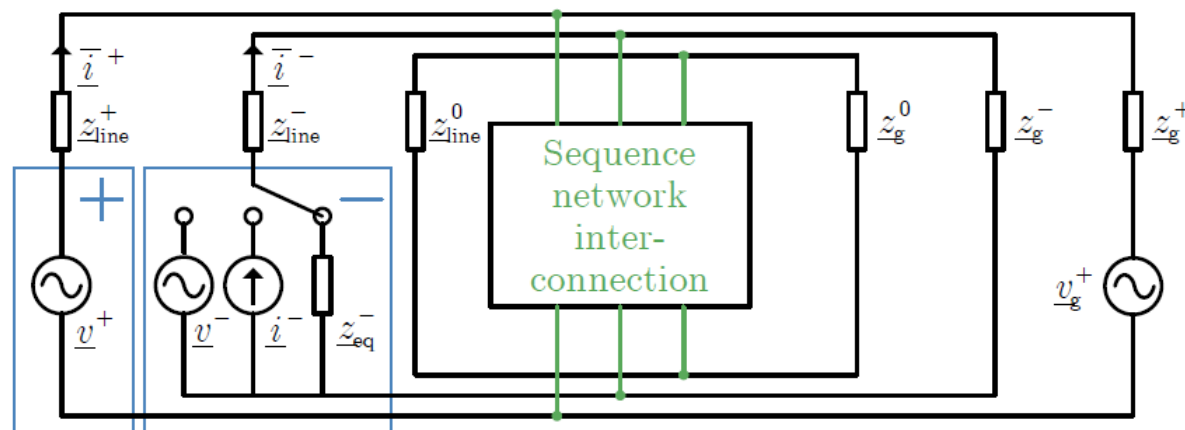
但是，如果考虑电网故障下电流饱和?

电网故障下的构网要求

- 同步
- 正序构网
 - 提供无功故障电流
 - 提供跳相有功电流
 - 5 ms 到 30 ms 内响应完成
- 负序支撑
 - 负序吸收无功电流, 提升电压平衡度
- 电流限幅

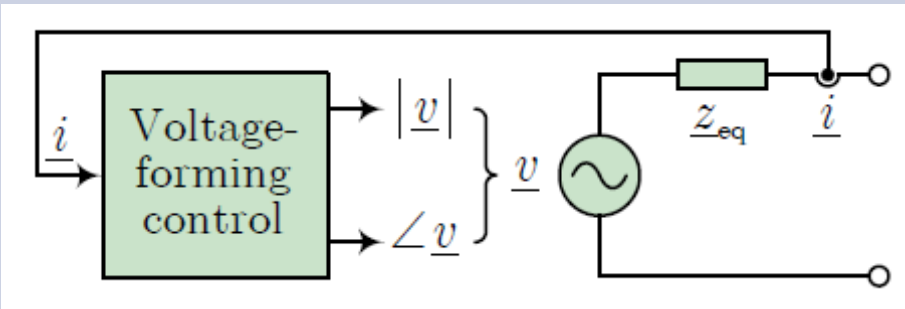
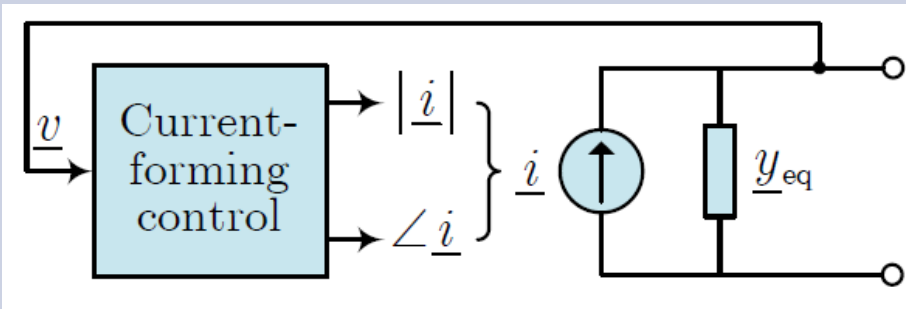


(a)

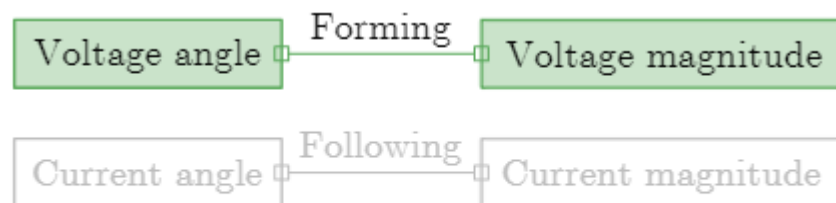


(b)

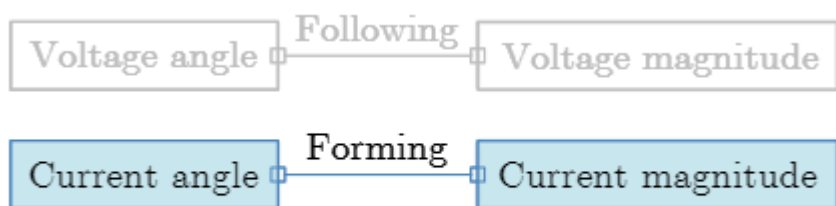
构网（构压） vs. 跟网（构流）

	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

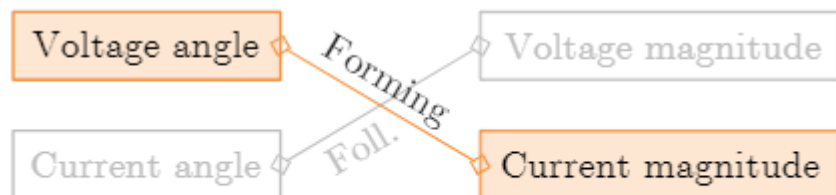
交叉构网控制 (Cross-forming control)



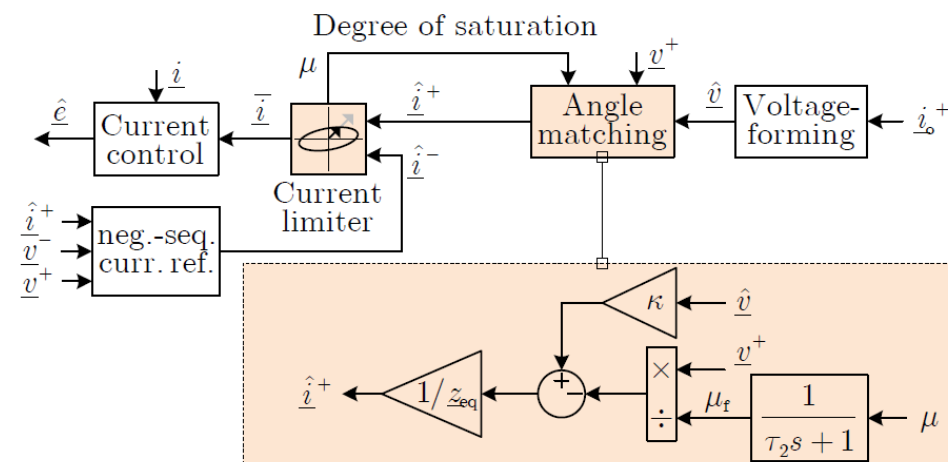
(a) Voltage-forming mode



(b) Current-forming mode



(c) Proposed cross-forming mode



电网电压

逆变器电流

有功输出

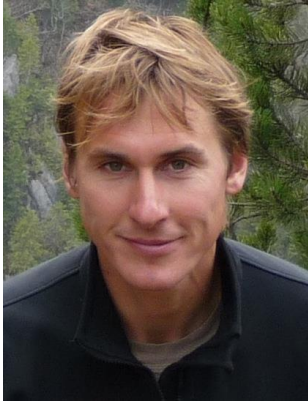
无功输出



总结

- **传统下垂、虚拟同步机在电网故障下的稳定性难以保证（如缺乏平衡点）**
- **复频率下垂控制是多输入多输出的、具备稳定性理论保障**
 - 微网、并网场景下稳定
 - 多时间尺度下稳定
 - 互联场景下稳定
- **交叉构网控制**
 - 结合构压和构流的优势
 - 具备固有限流能力
 - 保持频率构网和同步能力

致谢



Florian Dörfler
ETH 教授



Verena Häberle
ETH 博士生



Irina Subotic
ABB 科学家



黄林彬
浙江大学



Maitraya Desai
ETH 博士生



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 883985



<https://posytyf-h2020.eu/>

谢谢，请批评指正！

复频率构网控制

何秀强, 高级研究员

苏黎世联邦理工学院
2025年05月24日

