



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

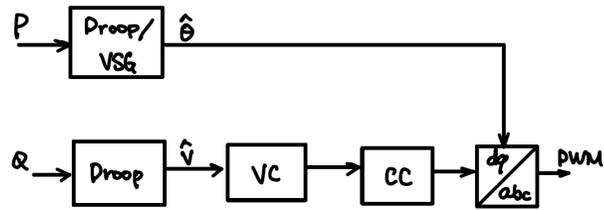
构网型变流器暂态运行及稳定控制

何秀强

清华大学自动化系
xhe@tsinghua.edu.cn
2025年11月22日

基本概念：什么是构网？

• 电力电子的视角

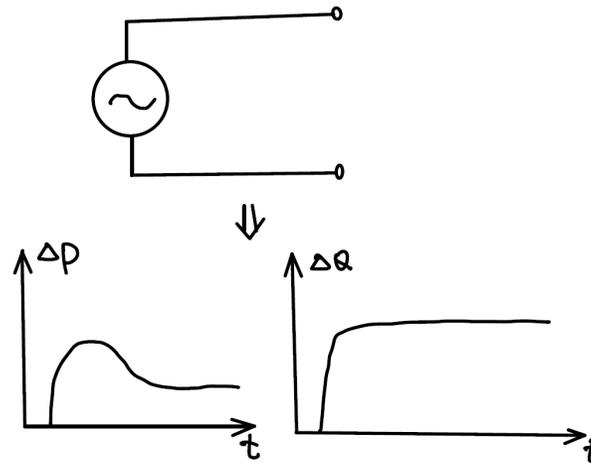


power-based sync. (Droop, VSG) \Rightarrow GFM
vs.
Voltage-based sync. (PLL) \Rightarrow GFL



Power electronics people
(From control block view)

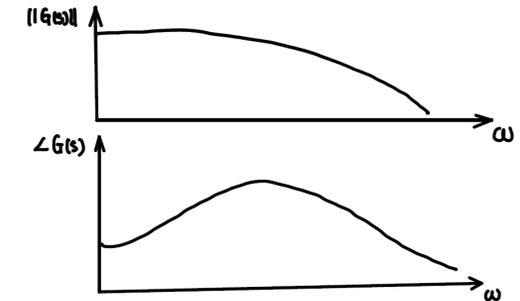
• 电力系统的视角



Power systems people
(From functionality view)

• 控制理论的视角

$$\begin{bmatrix} \Delta V(s) \\ \Delta f(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{vp}(s) & G_{vr}(s) \\ G_{fp}(s) & G_{fr}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P(s) \\ \Delta Q(s) \end{bmatrix}$$



Control systems people
(From response view)

基本概念：构网有哪些指标？

• 电力电子的视角

- 惯量大小
- 下垂系数
- 超前滞后校正
- 虚拟阻抗

- **限流阻抗**
- **暂态稳定性**

• 电力系统导则的视角

- 惯量大小
- 阻尼系数
- 调压系数
- 调频系数
- 宽频阻抗

- **等效暂态阻抗**
- **过流能力**

• 控制理论的视角

- 小扰动线性化响应
 - 增益、相位（裕度）
 - 带宽
 - 阻尼比

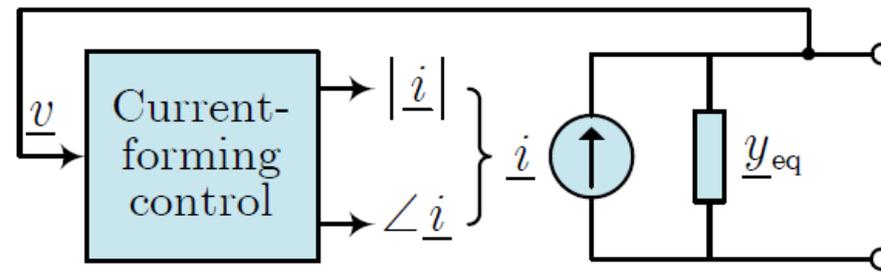
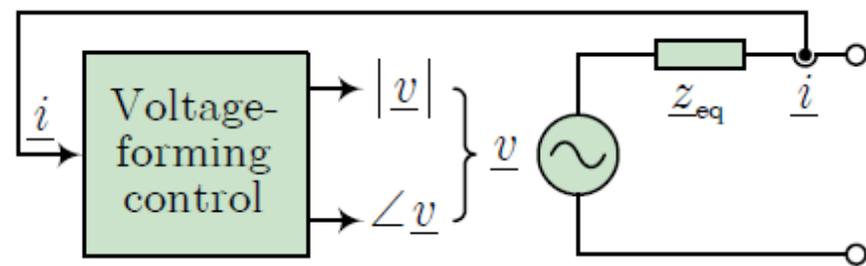
- **大扰动非线性响应**
 - **稳态增益**
 - **能量函数**
 - **无源性/耗散性**

基本概念：构网、跟网（构压、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、VOC等

锁相、对偶同步机等

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

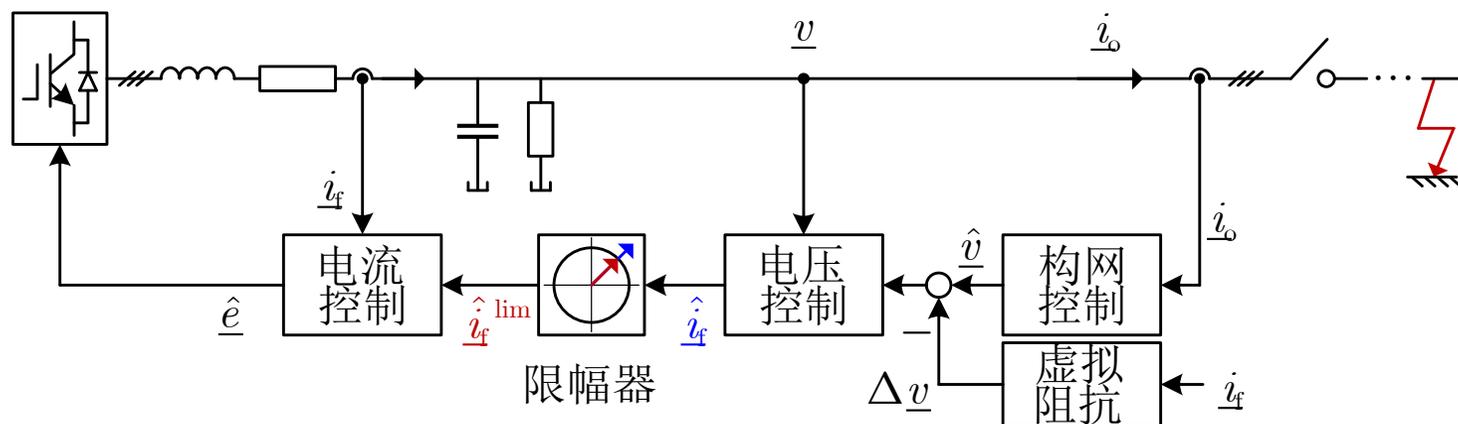
电流限幅

需要额外措施限流

具备固有限流能力

电网故障下构网变流器的控制难题

- 如何限流?
- 如何持续保持同步 (暂态稳定) ?
- 如何提供支撑?

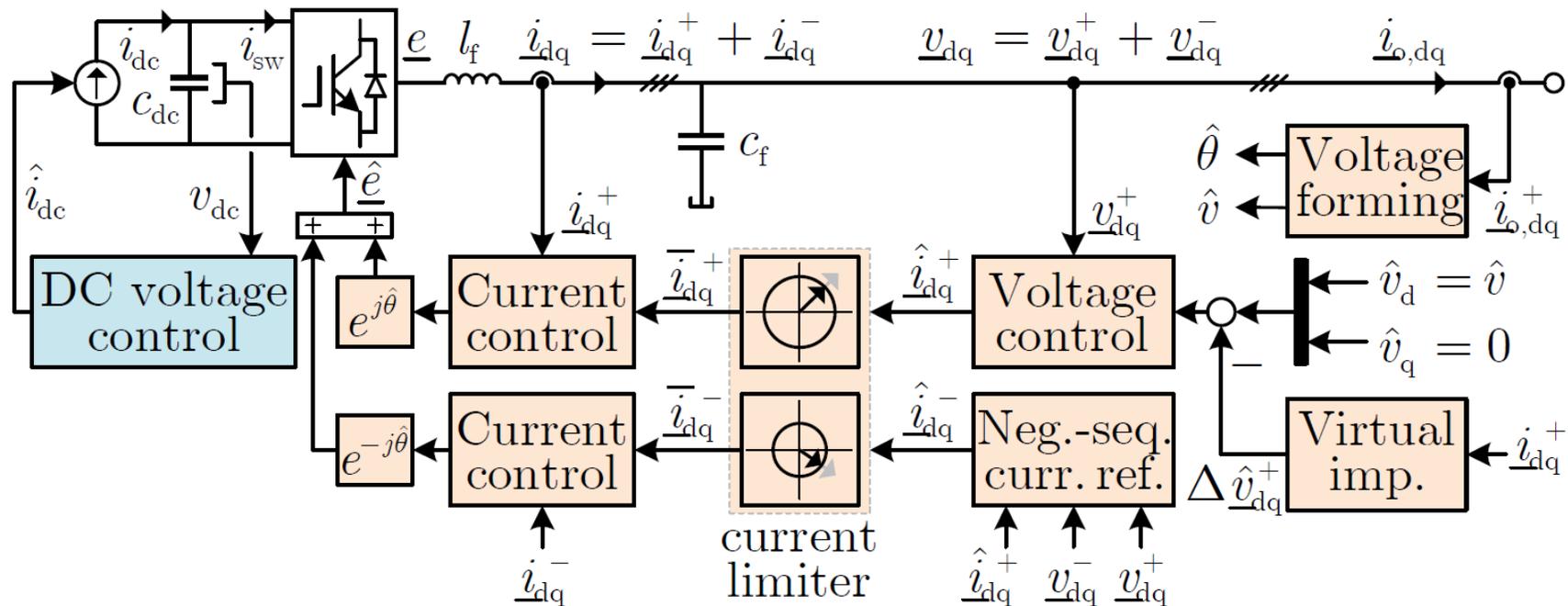


目录

- 一、构网控制的基本架构
- 二、暂态运行下的构网目标
- 三、故障电流限幅策略
- 四、暂态稳定控制
- 五、扩展为正负双序控制

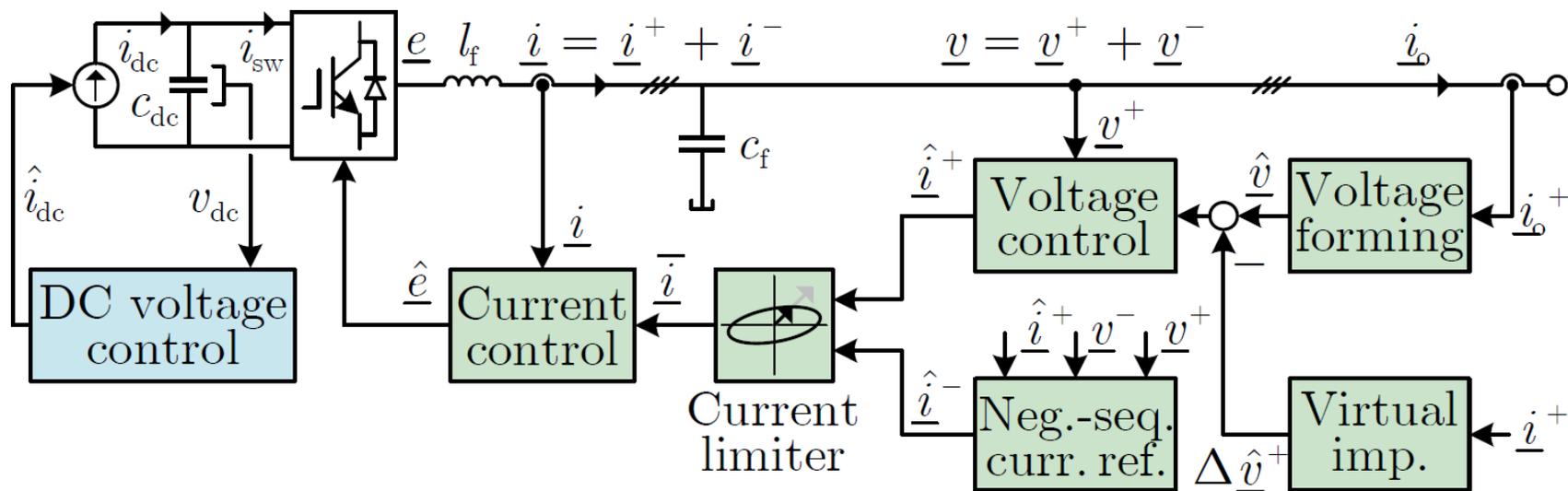
1.1 构网控制架构

- 旋转参考系下的控制架构
 - 参考角度来自构网控制
 - 电压电流内环采用PI



1.1 构网控制架构

- 静止参考系下的控制架构
 - 电压环指令为参考矢量
 - 电压电流内环采用PR



1.2 构网控制器

- 下垂控制

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\theta}} &= \hat{\omega} = \omega_0 + m_p(p^* - p) \\ \hat{v} &= v^* + m_q(q^* - q)\end{aligned}$$

- 虚拟同步机

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\theta}} &= \hat{\omega} \\ T_J \dot{\hat{\omega}} &= -D(\hat{\omega} - \omega_0) + (p^* - p) \\ \hat{v} &= v^* + m_q(q^* - q)\end{aligned}$$

- dVOC (复下垂控制)

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\theta}} &= \hat{\omega} = \omega_0 + \eta \left(\frac{p^*}{v^{*2}} - \frac{p}{\hat{v}^2} \right), \\ \frac{\dot{\hat{v}}}{\hat{v}} &= \hat{\varepsilon} = \eta \left(\frac{q^*}{v^{*2}} - \frac{q}{\hat{v}^2} \right) + \eta \alpha \frac{v^{*2} - \hat{v}^2}{v^{*2}}\end{aligned}$$

等价 \updownarrow

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

- AC/DC双端口构网控制

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\theta}} &= \hat{\omega} = \omega_0 + m_p(p^* - p) + m_{dc}(v_{dc} - v_{dc}^*) \\ \hat{v} &= v^* + m_q(q^* - q),\end{aligned}$$

1.3 电压电流控制

- 静止参考系下 PR 控制

$$\hat{\underline{i}}^+ = \left(k_p^v + k_r^v \frac{2\omega_v s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \right) (\hat{\underline{v}} - \underline{v}^+)$$

$$\hat{\underline{e}} = \left(k_p^c + k_r^c \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \right) (\bar{\underline{i}} - \underline{i})$$

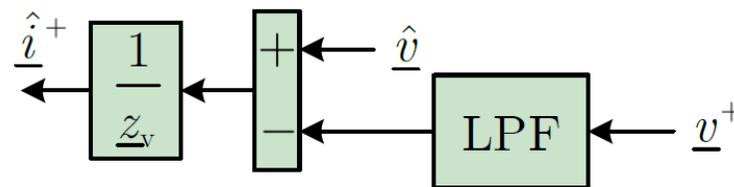
- 旋转参考系下 PI 控制

$$\hat{\underline{i}}_{dq}^+ = \left(k_p^v + k_i^v \frac{1}{s} \right) (\hat{\underline{v}}_{dq} - \underline{v}_{dq}^+)$$

$$\hat{\underline{e}}_{dq} = \left(k_p^c + k_i^c \frac{1}{s} \right) (\bar{\underline{i}}_{dq} - \underline{i}_{dq})$$

- 虚拟导纳控制 (复数比例控制)

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



目录

一、构网控制的基本架构

二、暂态运行下的构网目标

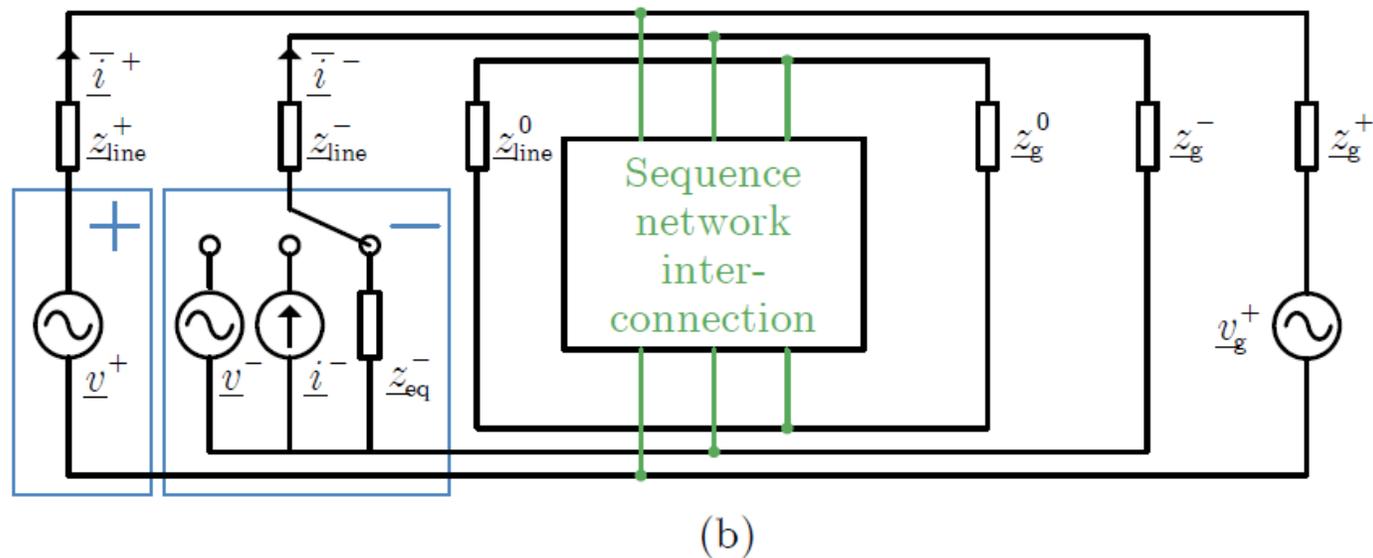
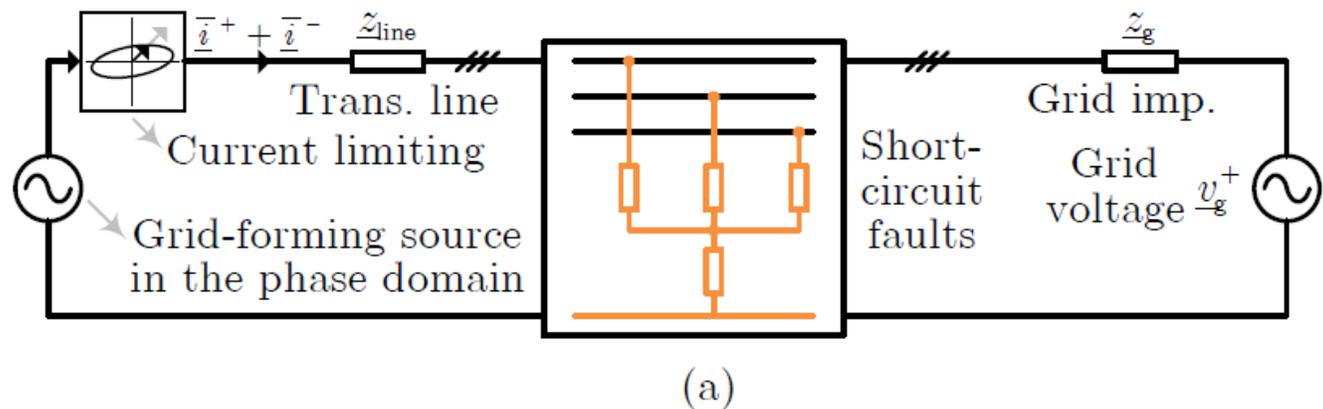
三、故障电流限幅策略

四、暂态稳定控制

五、扩展为正负双序控制

暂态运行下的主要构网目标

- **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.....）



目录

一、构网控制的基本架构

二、暂态运行下的构网目标

三、故障电流限幅策略

四、暂态稳定控制

五、扩展为正负双序控制

3.1 自适应虚拟阻抗 (阈值虚拟阻抗)

原理:

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

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

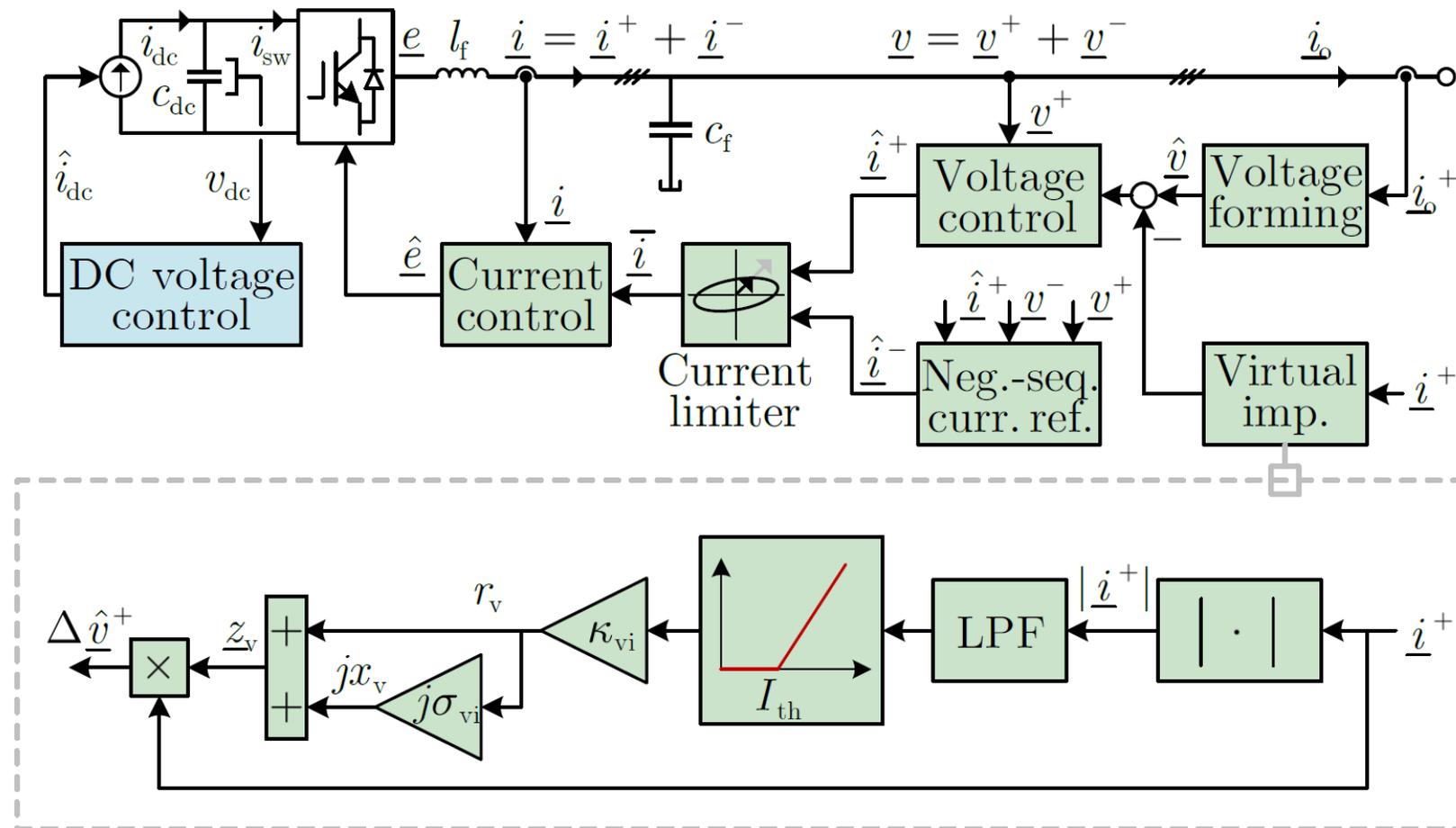
$$|\hat{v}| \leq |\hat{i}| r_v + jx_v = |\hat{i}| \kappa_{vi} \sqrt{\sigma_{vi}^2 + 1} (|\hat{i}| - I_{th})$$

$$\leq I_{lim} \kappa_{vi} \sqrt{\sigma_{vi}^2 + 1} (I_{lim} - I_{th})$$

$$\Rightarrow \kappa_{vi} \geq \frac{|\hat{v}|}{I_{lim} \sqrt{\sigma_{vi}^2 + 1} (I_{lim} - I_{th})}$$

特点:

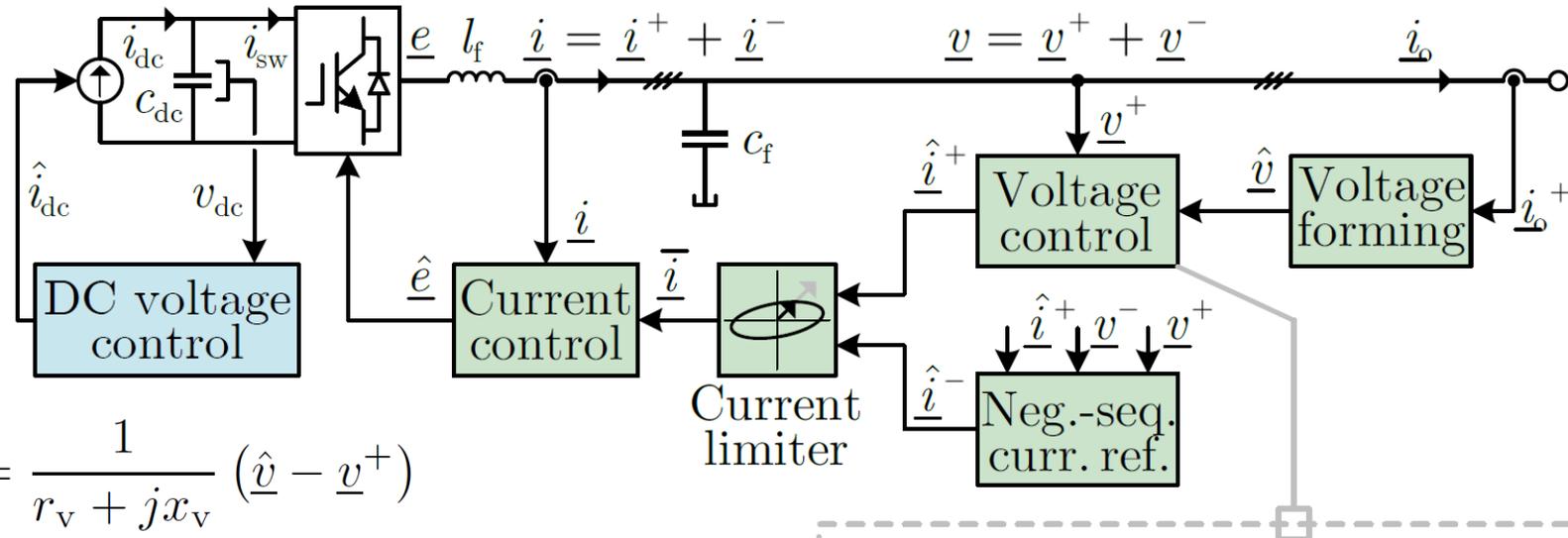
- 参数整定保守
- 无法充分利用过流能力
- 响应受到内环限制, 需结合限幅器使用



3.2 虚拟导纳 + 限幅器

原理:

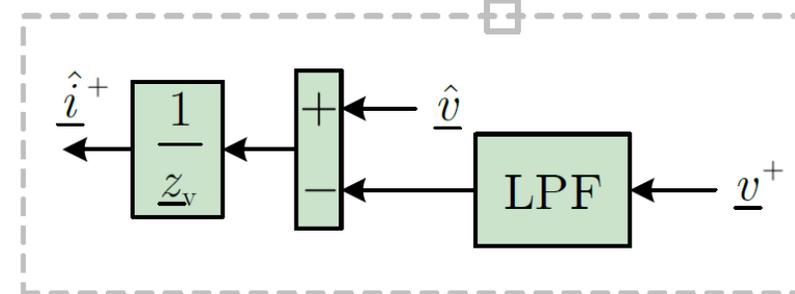
$$\hat{i} = \begin{cases} \hat{i}, & |\hat{i}| \leq I_{\text{lim}} \\ \frac{I_{\text{lim}}}{|\hat{i}|} \hat{i}, & |\hat{i}| > I_{\text{lim}} \end{cases}$$



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

特点:

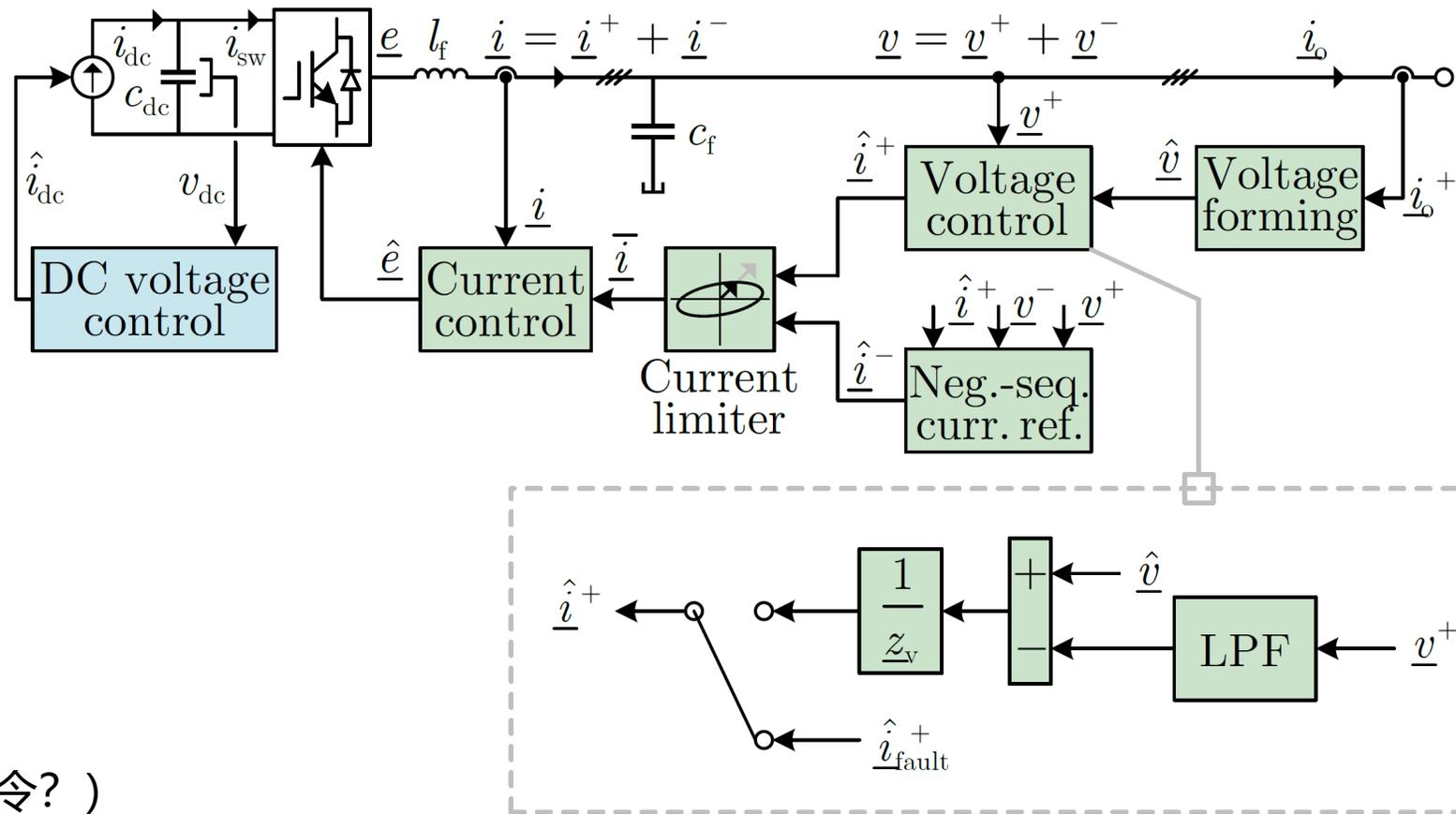
- + 实现简单, 整定容易
- + 可充分利用过流能力



3.3 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?)

目录

一、构网控制的基本架构

二、暂态运行下的构网目标

三、故障电流限幅策略

四、暂态稳定控制

五、扩展为正负双序控制

4.1 暂态失稳概念和原因

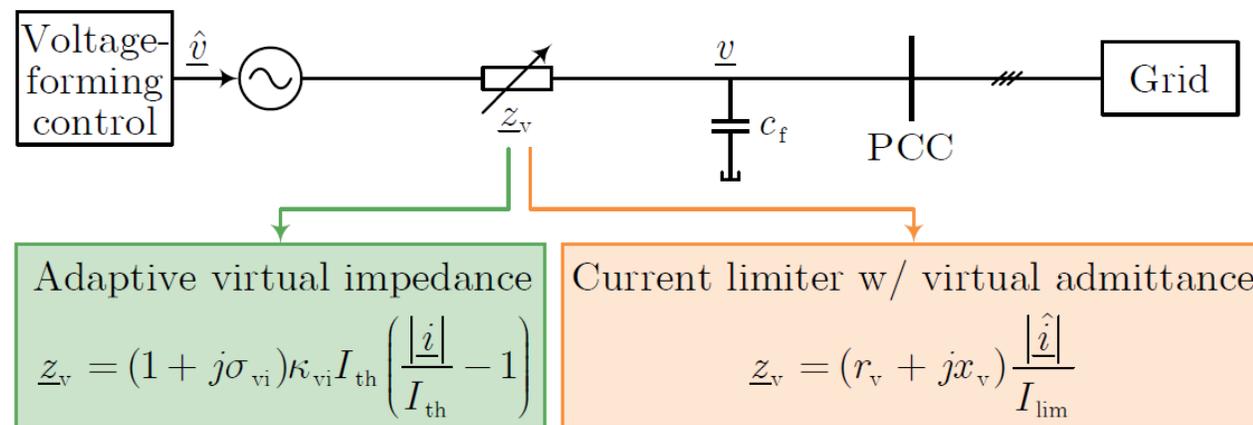
- 等效暂态阻抗增大 (电流依赖)

- 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

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

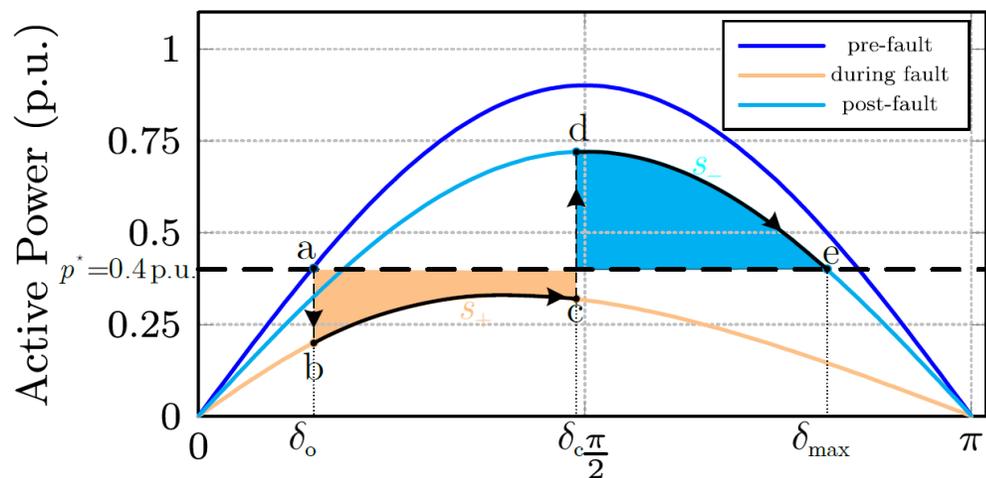


4.1 暂态失稳概念和原因

- 等效功角关系

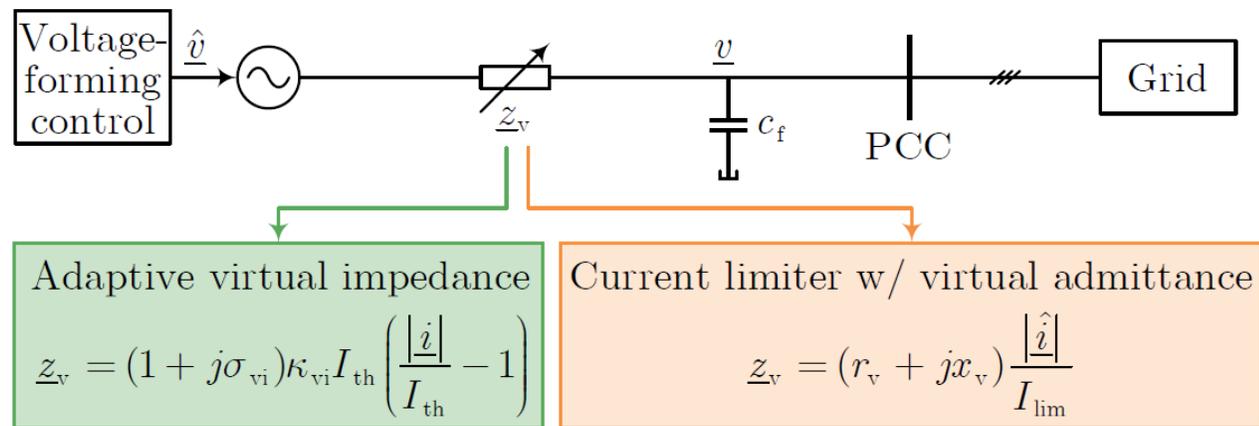
- 采用虚拟导纳 + 限幅器控制 (以此为例)

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



- 👉 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



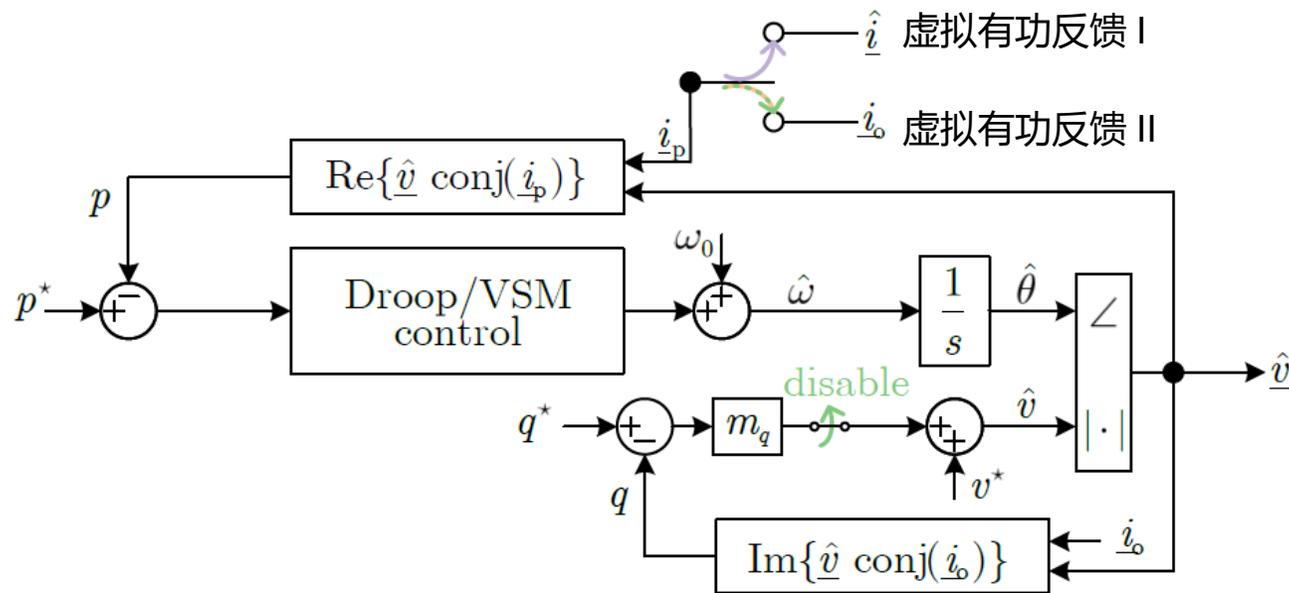
4.2 虚拟有功控制

• 基于电流指令的虚拟有功反馈 I

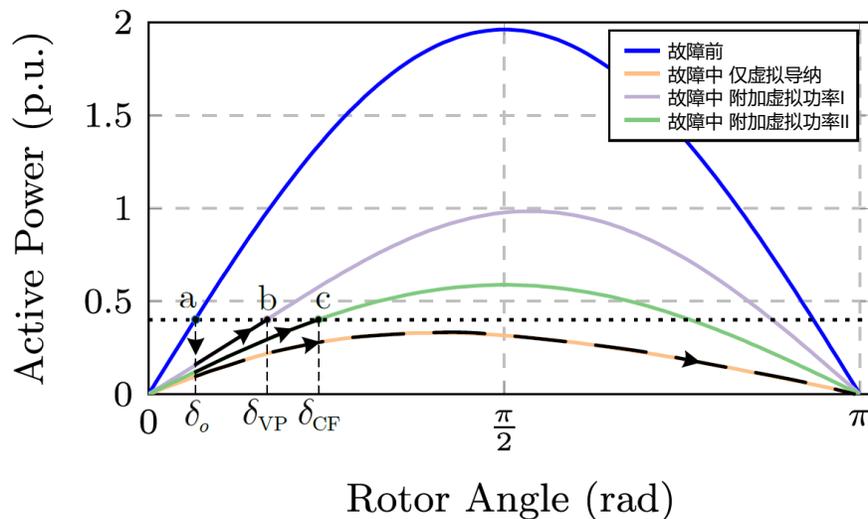
$$p_{VP} = \operatorname{Re} \left(\underline{\hat{v}} \cdot \operatorname{conj}(\underline{\hat{i}}) \right) = \frac{v_g \cdot \hat{v}}{x_v + \mu \cdot x_g} \sin \delta$$

• 基于电压指令的虚拟有功反馈 II

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

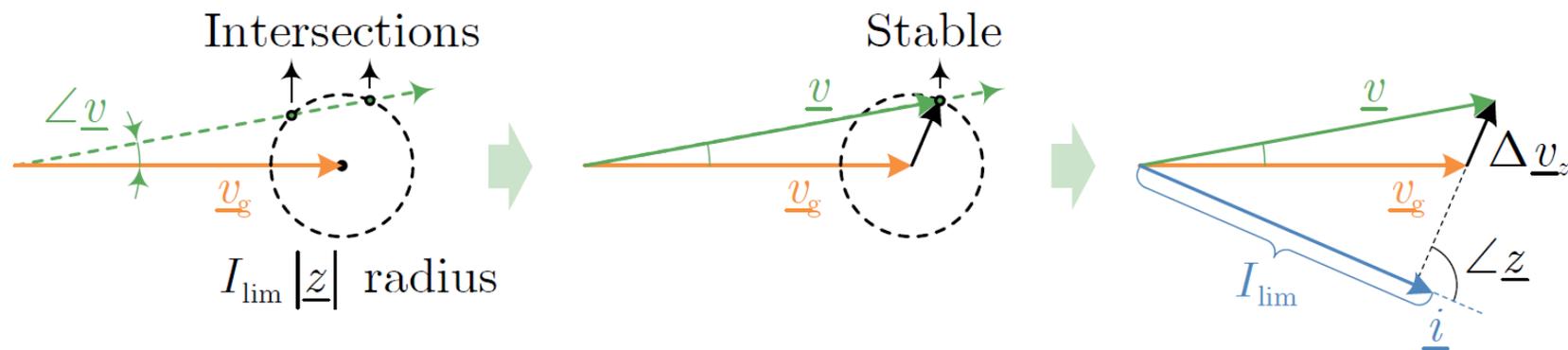
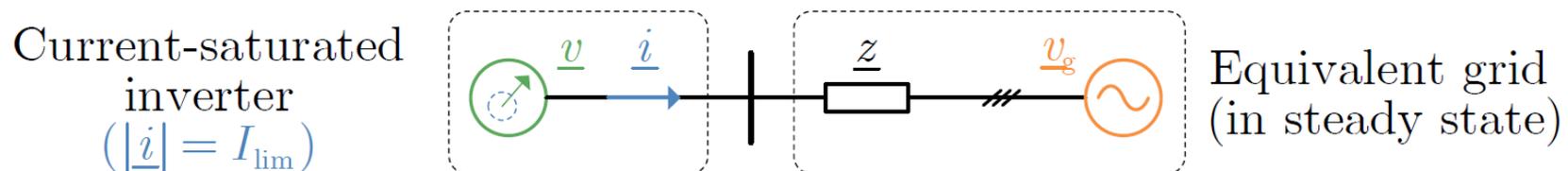


有功指令仍需适当降低



4.3 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

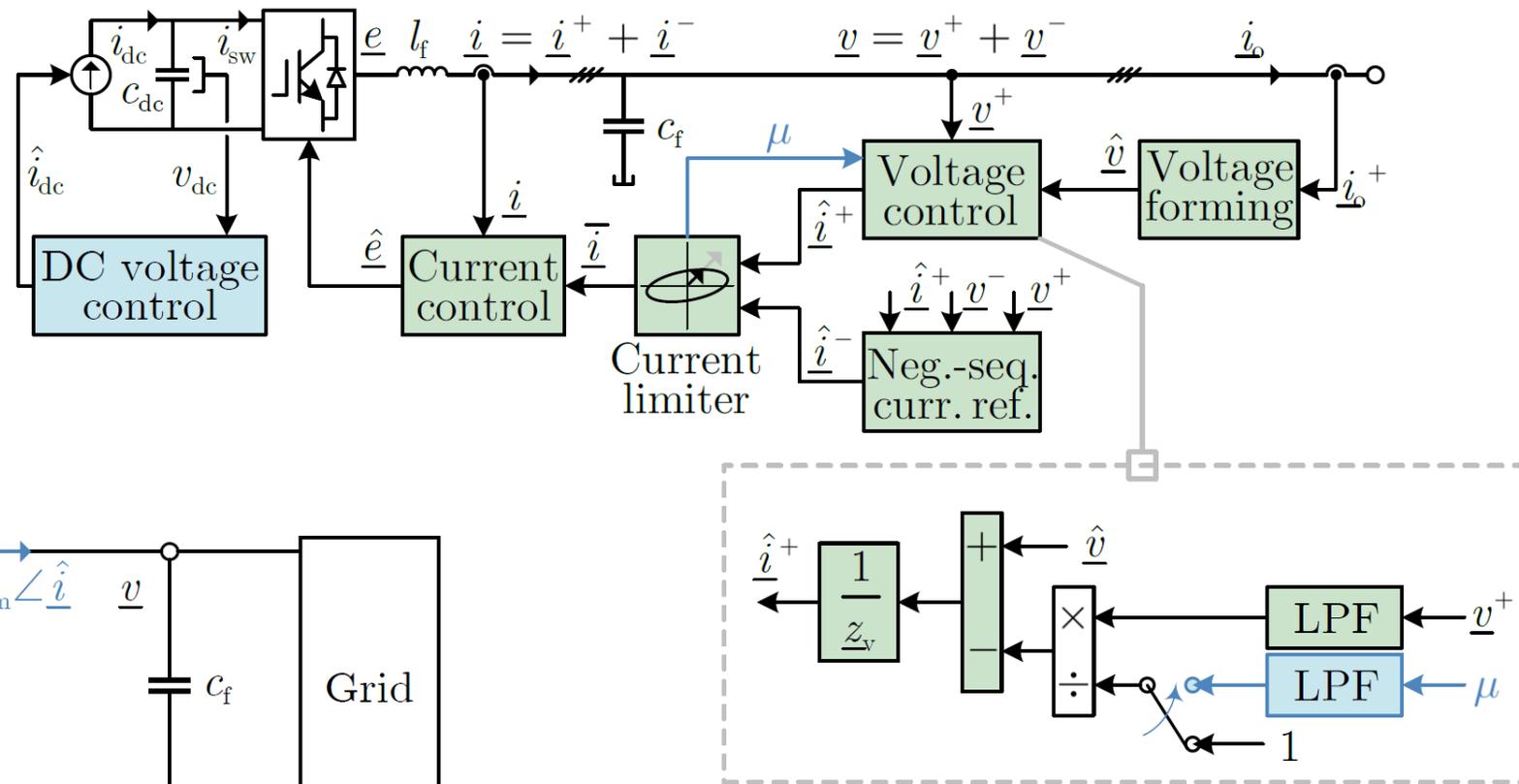
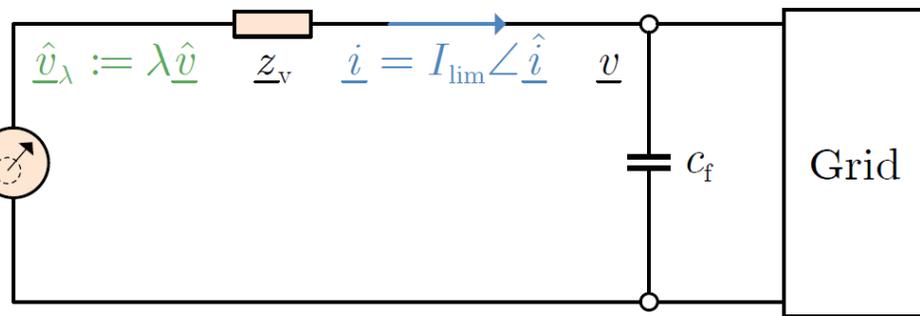
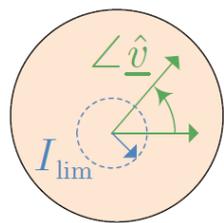
4.3 交叉构网控制

- 施加“饱和度”反馈 🙌 交叉构网

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

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

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



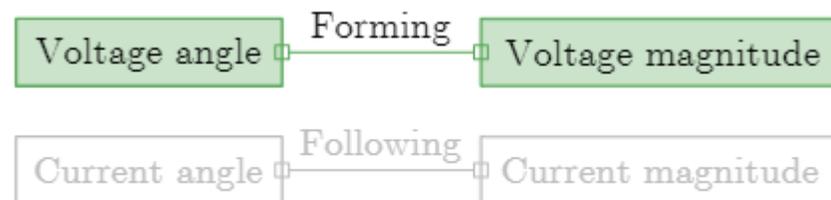
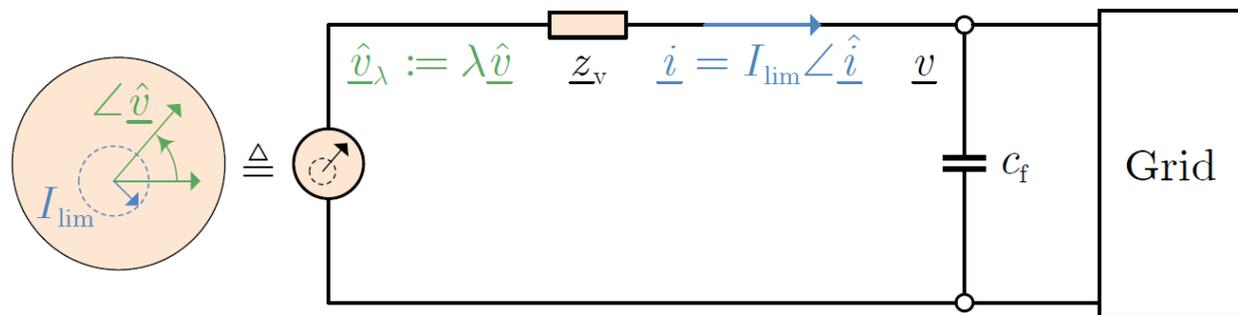
4.3 交叉构网控制

- 施加“饱和度”反馈👉交叉构网

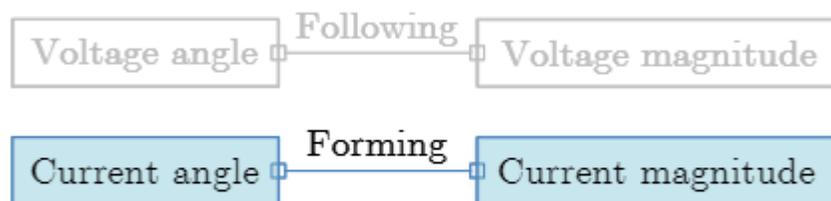
$$\text{DoS (balanced): } \mu \stackrel{\text{(saturated)}}{=} \frac{I_{\text{lim}}}{|\hat{i}|},$$

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

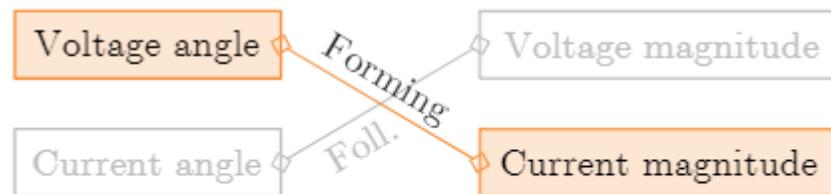
$$\kappa \mu \hat{v} = z_v \hat{i} + \underline{v}$$



(a) Voltage-forming mode



(b) Current-forming mode



(c) Proposed cross-forming mode

目录

一、构网控制的基本架构

二、暂态运行下的构网目标

三、故障电流限幅策略

四、暂态稳定控制

五、扩展为正负双序控制

5.1 负序电流控制

- **模式I: 平衡电流控制**

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

- **模式II: 有功二倍频振荡抑制**

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

- **模式III: 无功二倍频振荡抑制**

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

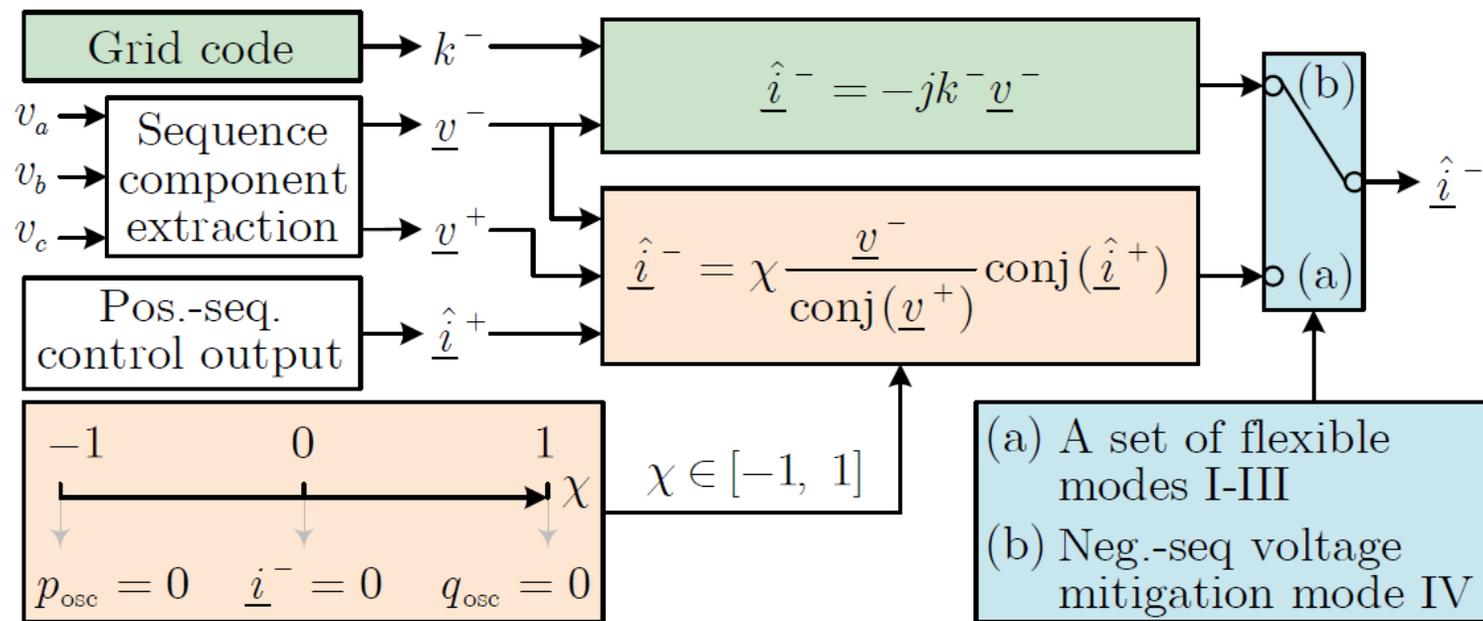
- **复合模式: 模式I-III的复合**

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

推导证明见参考文献[1]

5.1 负序电流控制

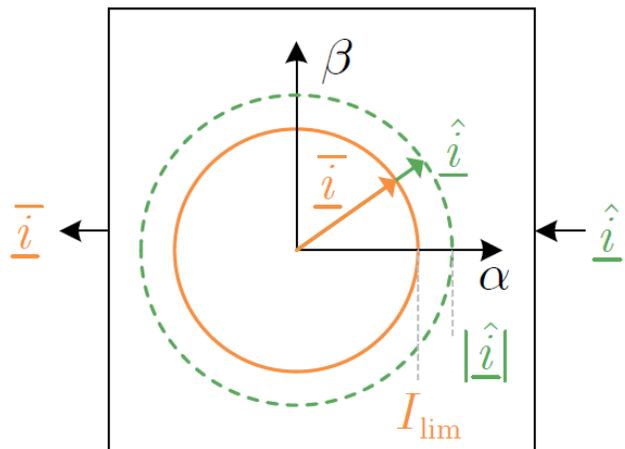
- 模式IV: 负序虚拟阻抗 (电压抑制) $\hat{\underline{i}}^- = -jk^- \underline{v}^-$



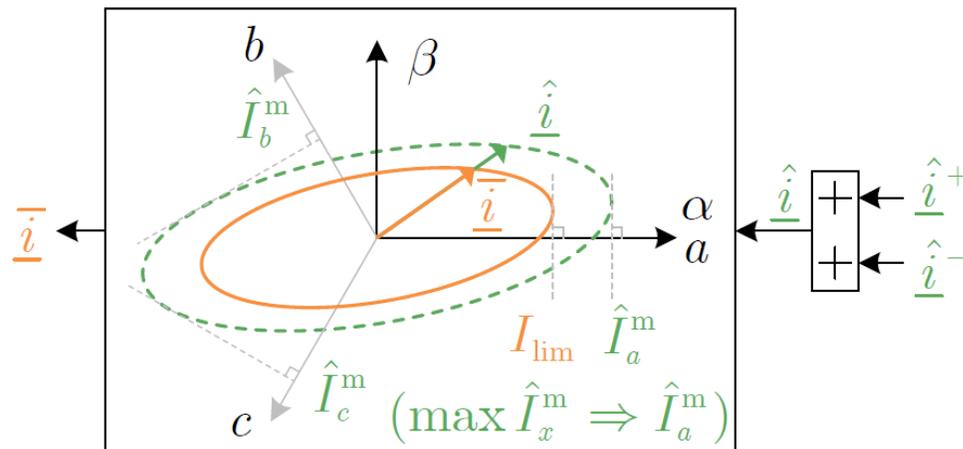
5.2 三相不平衡电流的限幅器

• 静止参考系下限幅器

– 平衡工况



– 非平衡工况



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

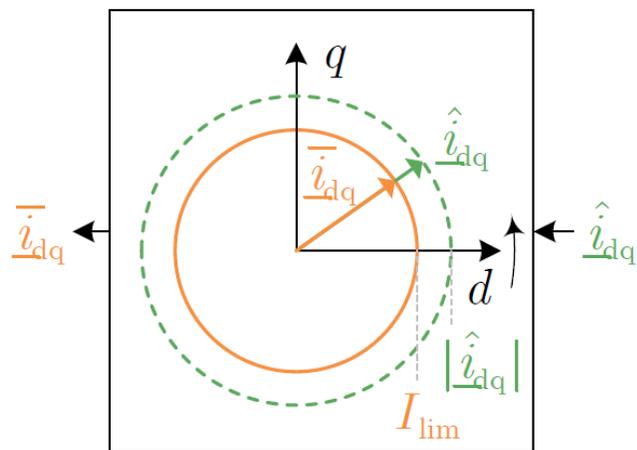
$$\hat{i} = \begin{cases} \hat{i}, & \max\{\hat{I}_a^m, \hat{I}_b^m, \hat{I}_c^m\} \leq I_{\text{lim}}, \\ \frac{I_{\text{lim}}}{\max\{\hat{I}_a^m, \hat{I}_b^m, \hat{I}_c^m\}} \hat{i}, & \max\{\hat{I}_a^m, \hat{I}_b^m, \hat{I}_c^m\} > I_{\text{lim}}. \end{cases}$$

μ

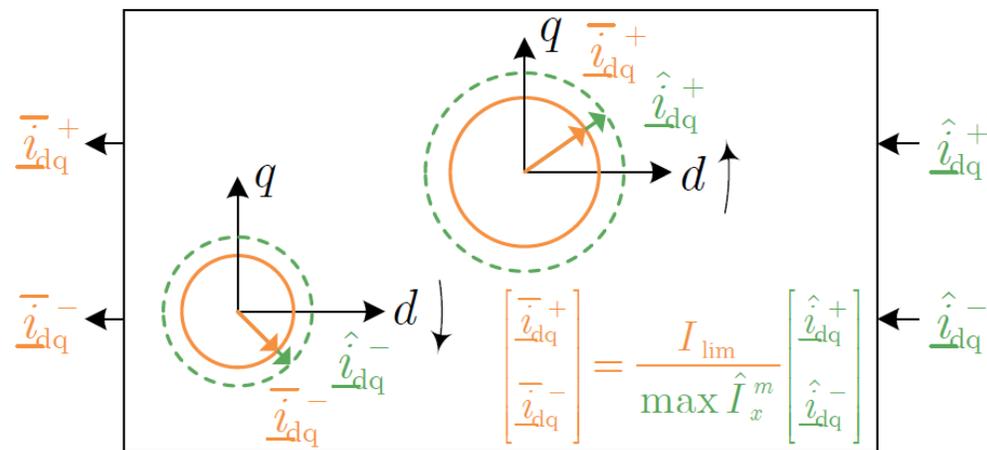
5.2 三相不平衡电流的限幅器

• 旋转参考系下限幅器

– 平衡工况



– 非平衡工况



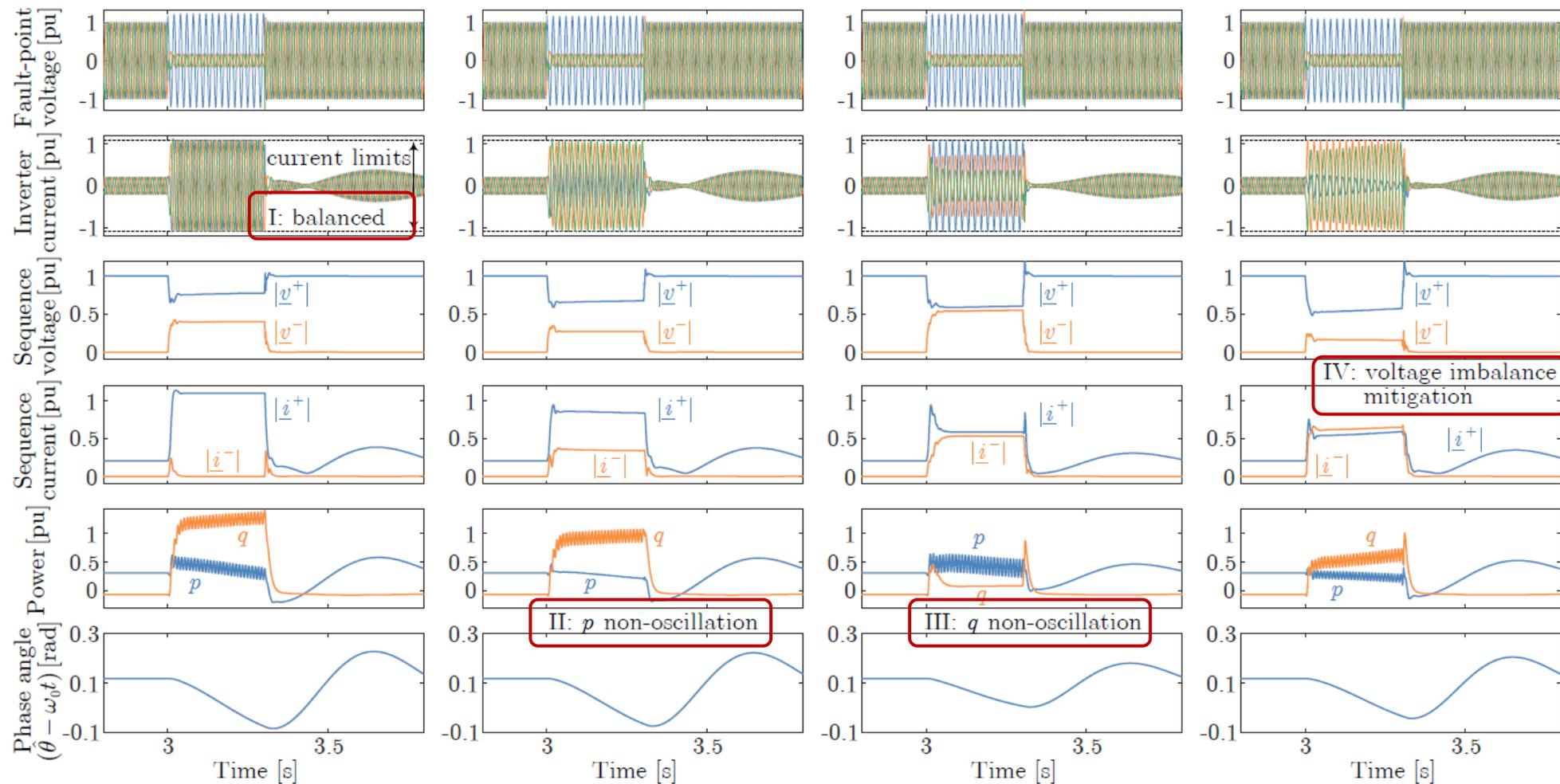
$$\hat{I}_x^m = \sqrt{|\hat{i}_{dq}^+|^2 + |\hat{i}_{dq}^-|^2 + 2 \operatorname{Re}\{\hat{i}_{dq}^+ \hat{i}_{dq}^- e^{j2\lambda_x}\}}$$

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

μ

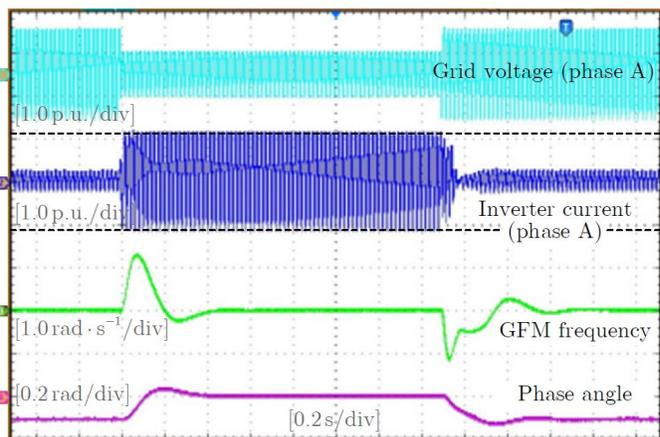
验证结果

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

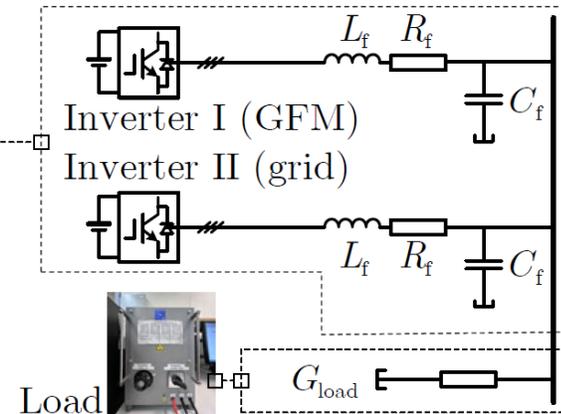


验证结果

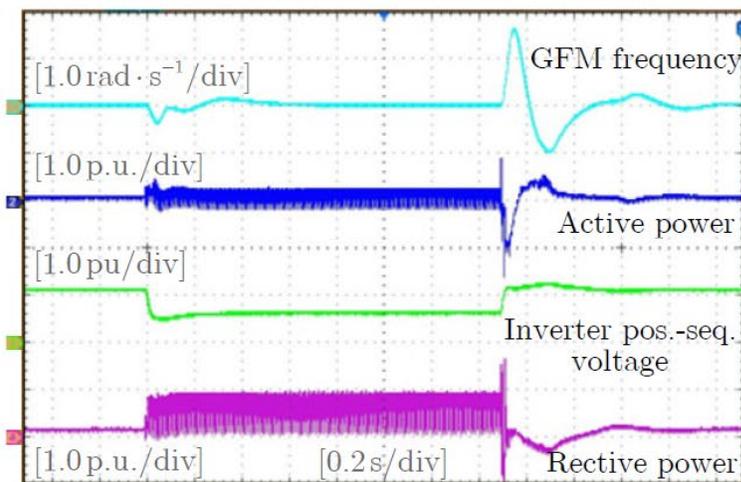
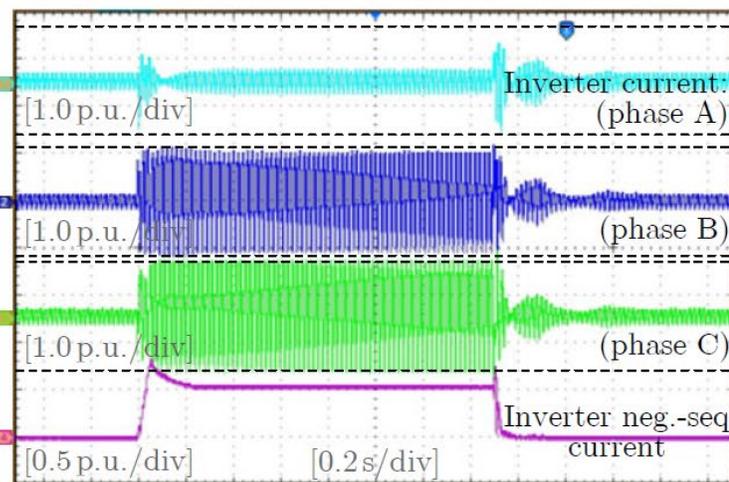
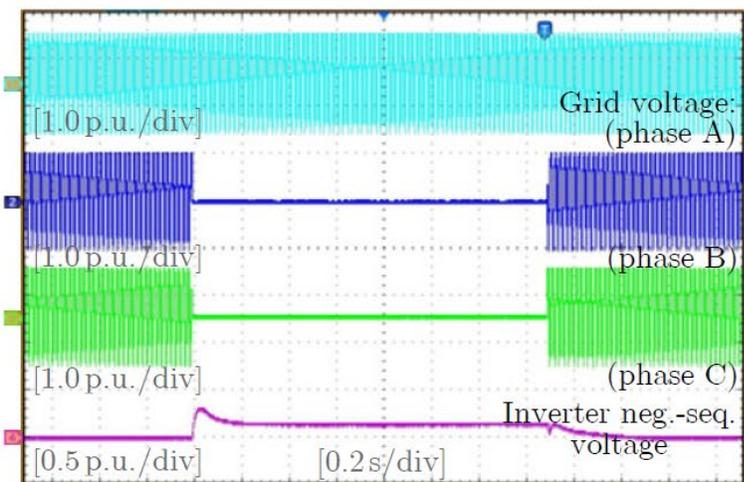
实际逆变器实验验证



对称跌落



非对称跌落



总结

1. **故障电流限制、暂态同步稳定、构网支撑**是构网逆变器在暂态运行下的三大控制目标
2. 非平衡工况下，**正序控制优先**，负序控制灵活可选
3. **虚拟导纳控制 + 限幅器**似乎比自适应虚拟阻抗控制更简单实用（?），但两者都会导致电流依赖的**等效暂态阻抗**
4. **电压跌落、有功指令过高、时变的等效阻抗**是暂态失稳的典型原因，可通过虚拟有功反馈提升功角曲线，通过降低有功指令提升暂态稳定性
5. 可通过**交叉构网控制**实现恒定的等效阻抗

参考文献

- [1] **He, Xiuqiang**, et al. "Cross-forming control and fault current limiting for grid-forming inverters." IEEE Transactions on Power Electronics (2024).
- [2] Desai, Maitraya Avadhut, **He, Xiuqiang***, Huang, Linbin, et al. "Saturation-informed current-limiting control for grid-forming converters." Electric Power Systems Research 234 (2024): 110746.
- [3] Desai, Maitraya Avadhut, Ramona, Stoll, **He, Xiuqiang**, et al. "Comparison of Current-Limiting Strategies for Grid-Forming Converters Under Grid Faults." 2025 IEEE Kiel PowerTech. IEEE, 2025.
- [4] **He, Xiuqiang**, Desai Maitraya, Huang Linbin, Dörfler Florian. "Method and a controller for controlling a grid forming converter." PCT/EP2025/059412[P], 2025-04-07. (国际 PCT 专利)
- [5] Kkuni, Kanakesh Vatta, and Guangya Yang. "Effects of current limit for grid forming converters on transient stability: analysis and solution." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 158 (2024): 109919.
- [6] Wu, Heng, and Xiongfei Wang. "Small-signal modeling and controller parameters tuning of grid-forming VSCs with adaptive virtual impedance-based current limitation." IEEE Transactions on Power Electronics 37.6 (2021): 7185-7199.

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





清华大学 自动化系

Department of Automation, Tsinghua University

谢谢，请批评指正！

构网型变流器暂态运行及 稳定控制

何秀强 助理研究员

清华大学自动化系
2025年11月22日

POWER IS NOTHING WITHOUT CONTROL

