



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



电力电子与新能源技术研究中心
Power Electronics and Renewable Energy Center

分布式储能中多变流器系统 构网控制与振荡分析

刘增
西安交通大学

第二十一届中国电气自动化与电控系统学术年会
储能与综合能源专题

2024.5.25 · 天津



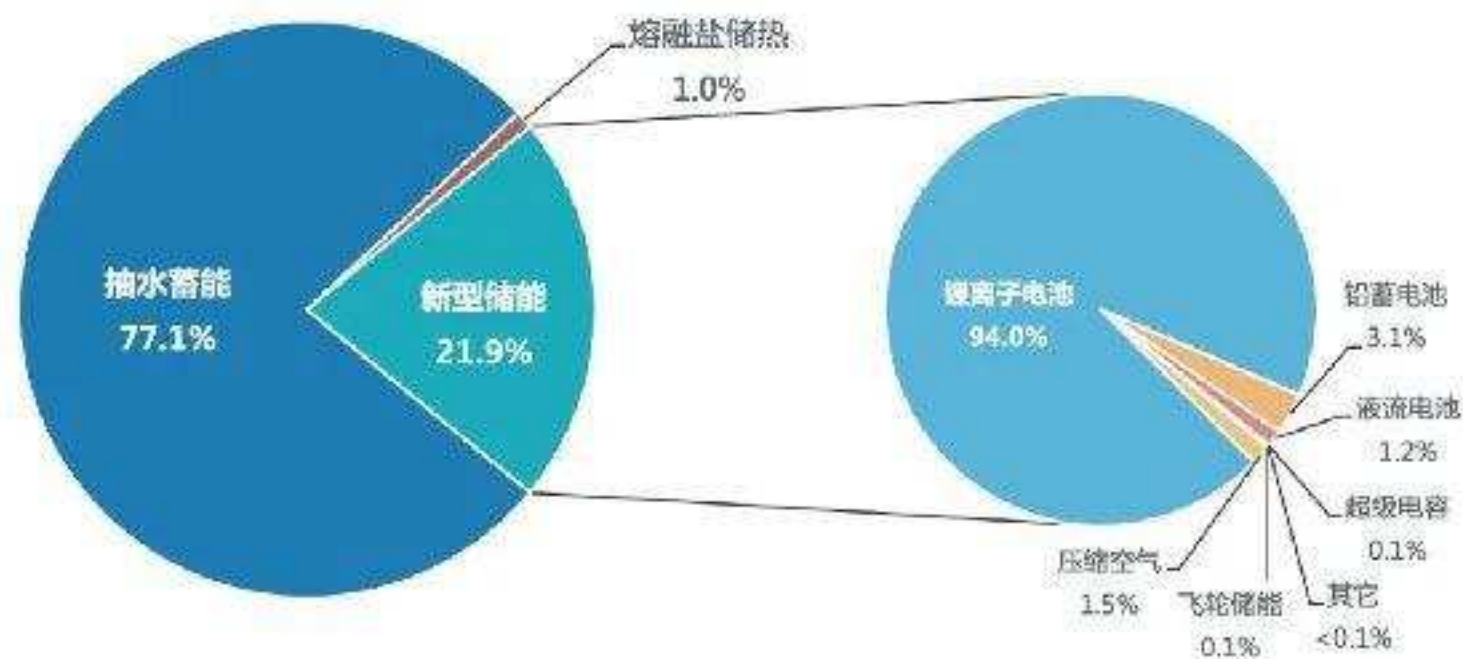
内容提要

- 研究背景
- 系统架构
- 构网控制技术
- 系统振荡分析
- 结论

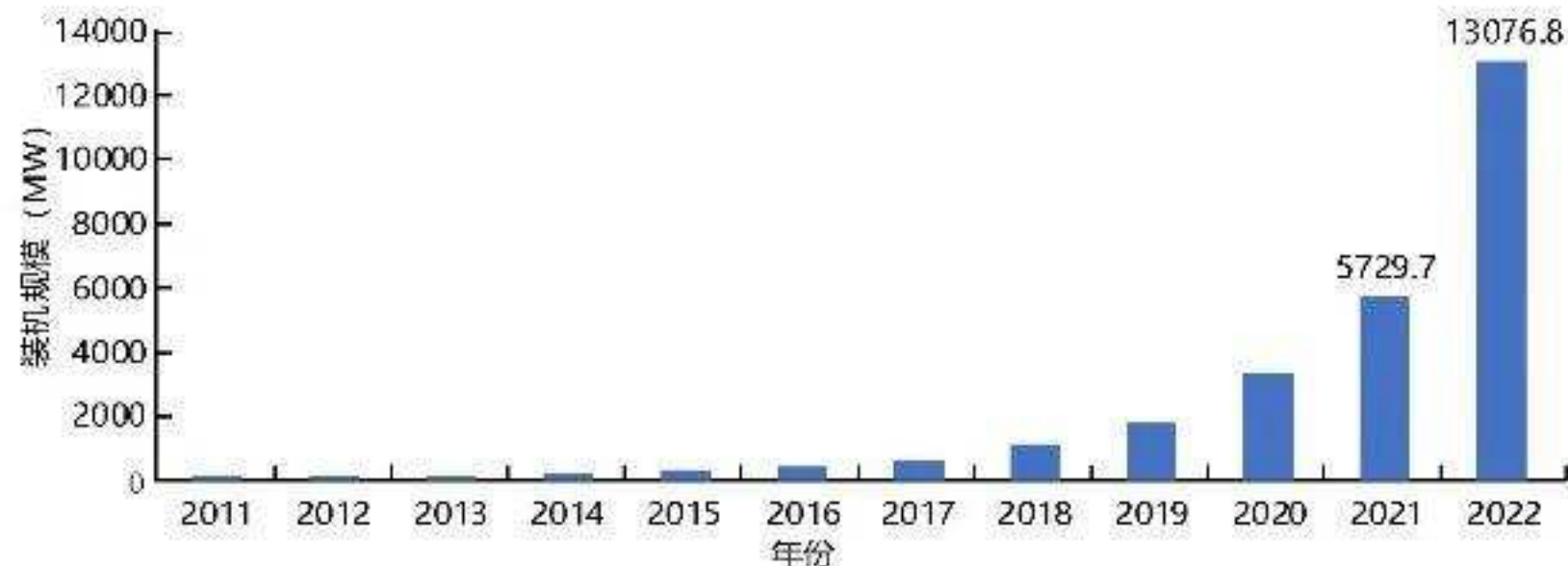


研究背景

■ 电力储能发展现状



2022年我国电力储能累计装机规模



近10年我国新型储能累计装机规模

- 新型储能获得高速发展，其累计装机占比已突破20%

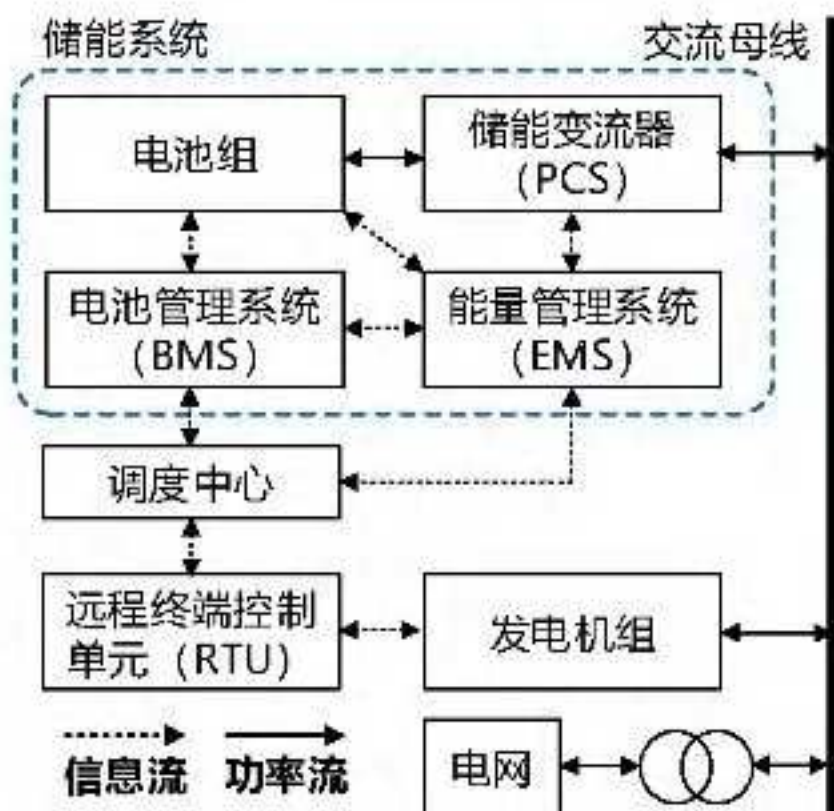


研究背景

■ 新型储能应用场景

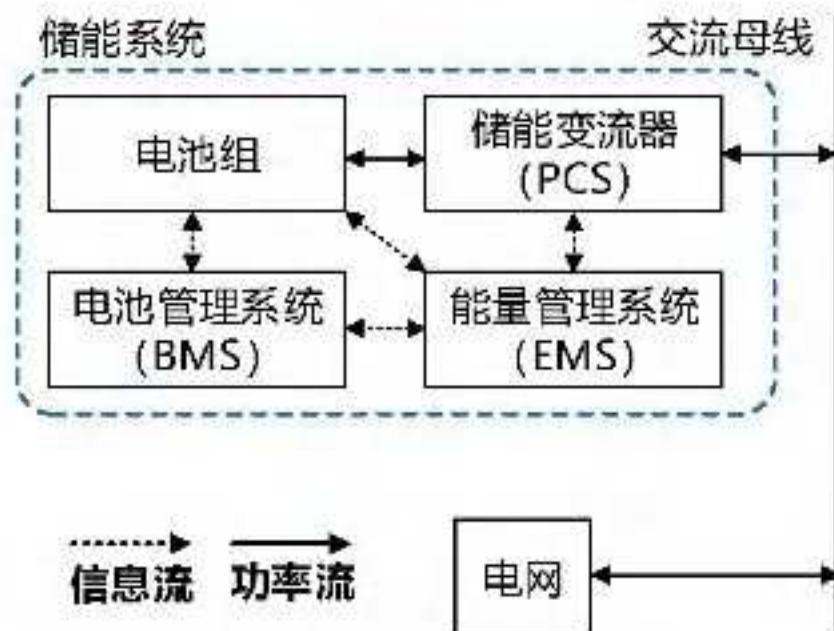
电源侧储能

- 新能源高效消纳
- 调峰与调频
- 可再生能源外送



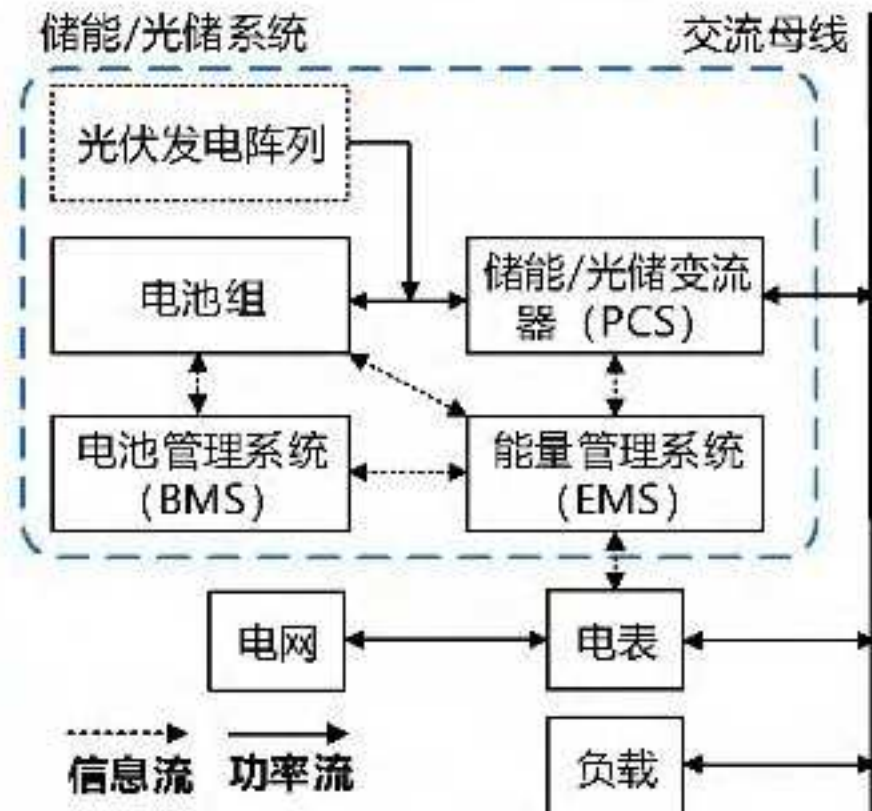
电网侧储能

- 安全稳定运行
- 增强供电保障能力
- 提升应急保障能力



用户侧储能

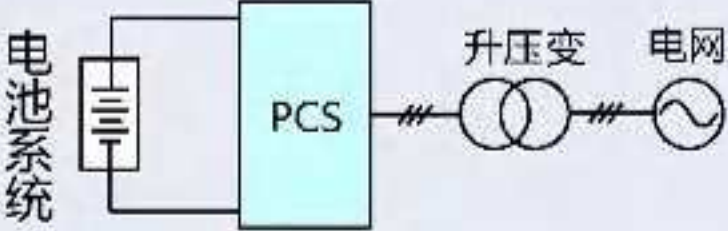
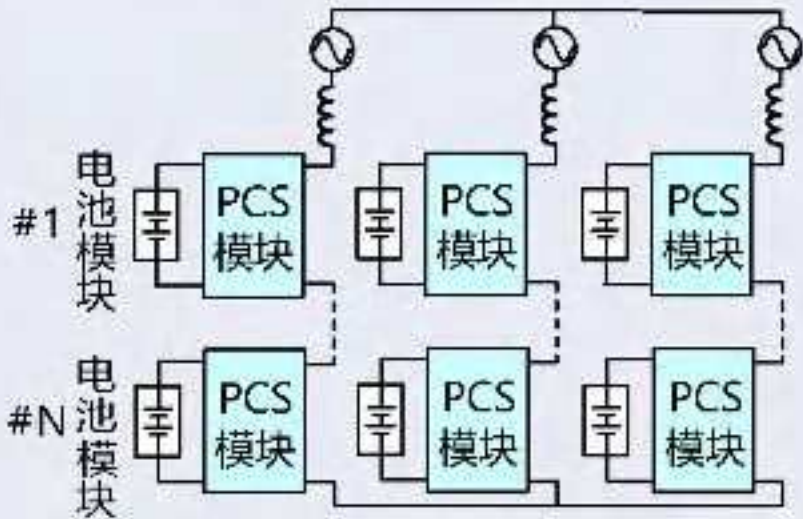
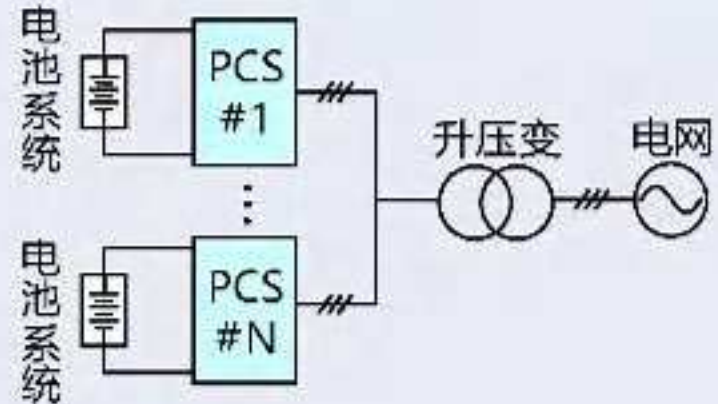
- 分布式供能
- 定制化用能
- 峰谷电价盈利





研究背景

典型储能系统架构

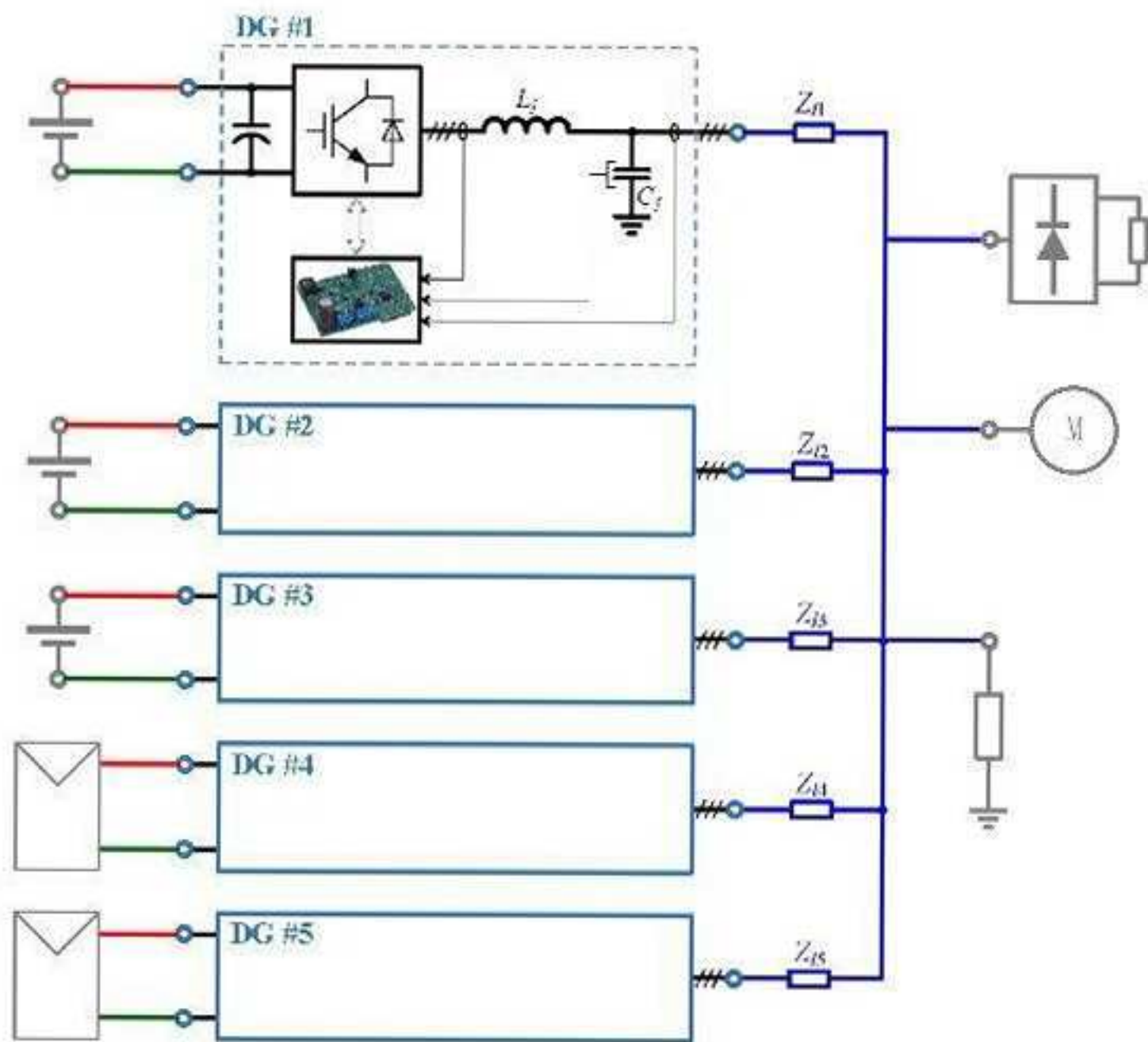
	集中式储能系统	高压直挂式储能系统	分布式储能系统
系统架构			
电池	• 并联数量多，并联环流高	• 并联数量少，并联环流低	• 并联数量少，并联环流低
BMS	• 电池均流、环流问题突出，成本相对较高	• 电池均流、环流问题不突出 • 成本相对较低	• 电池均流、环流问题不突出 • 成本相对较低
PCS	• 效率低，总体容量有限 • 结构简单	• 效率高，容量大 • 结构复杂，共模电流大	• 效率高，扩容便捷 • 协调控制难度大

- 分布式储能系统易扩容、初期投资小，具有很好的市场前景
- 储能变流器离网并联运行面临诸多挑战



研究背景

分布式储能中多变流器系统运行面临的挑战



免通讯
控制架构

👍 可靠性高
👍 安装成本低
👍 运维便捷

⚙️ 功率分配控制
⚙️ 电压质量控制
⚙️ 交互振荡抑制



内容提要



- 研究背景
- **系统架构**
- 构网控制技术
- 系统振荡分析
- 结论



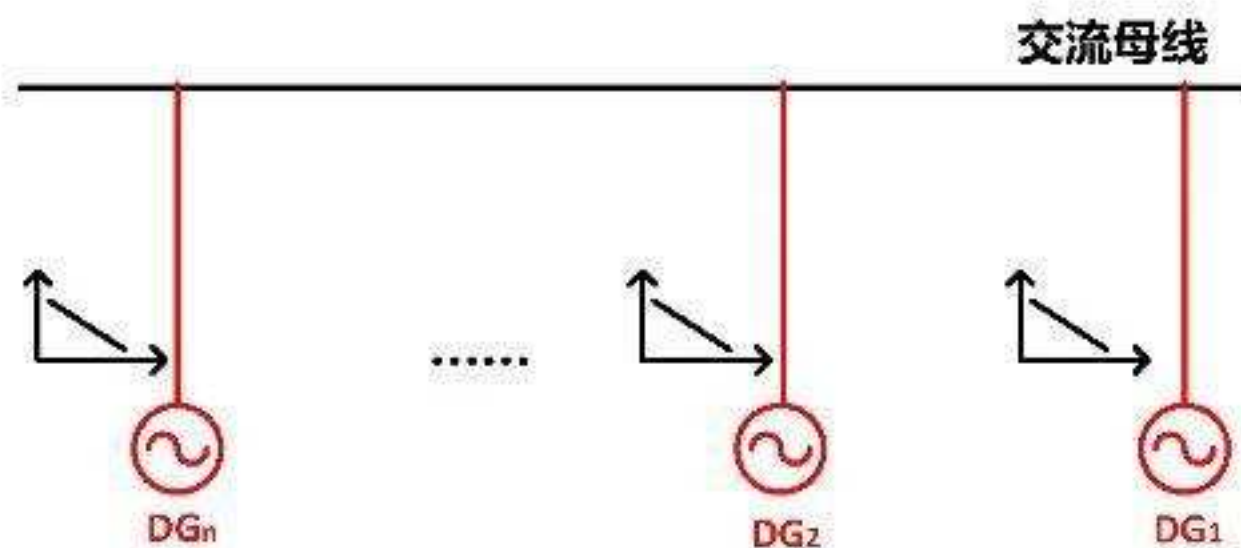
系统架构

▪ 储能变流器离网并联基本架构



**主从架构
(跟网控制)**

- ☺ 变流器之间耦合弱
- ☹ 可靠性依赖于主电源
- ☹ 主电源容量大



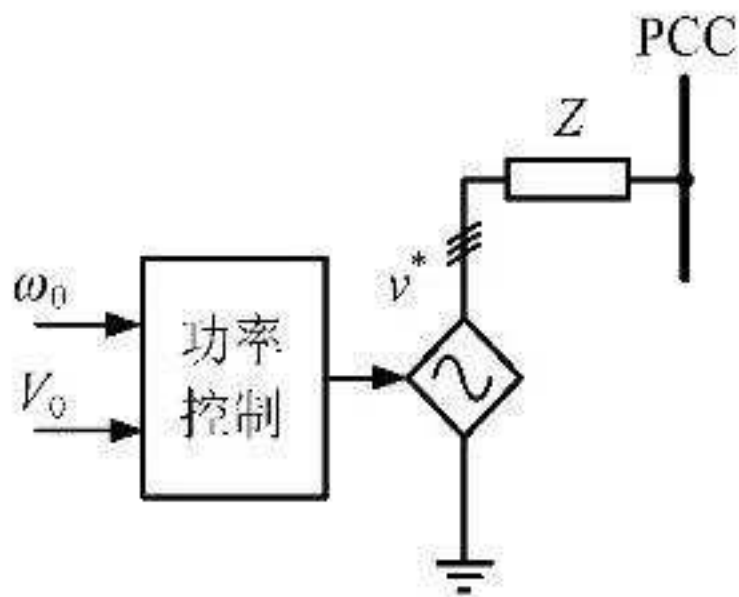
**对等架构
(构网控制)**

- ☺ 电源独立控制，可靠性高
- ☹ 频率同步和有功功率均分
- ☹ 变流器之间耦合强

- **对等架构**较主从架构**更适合**储能变流器离网并联运行

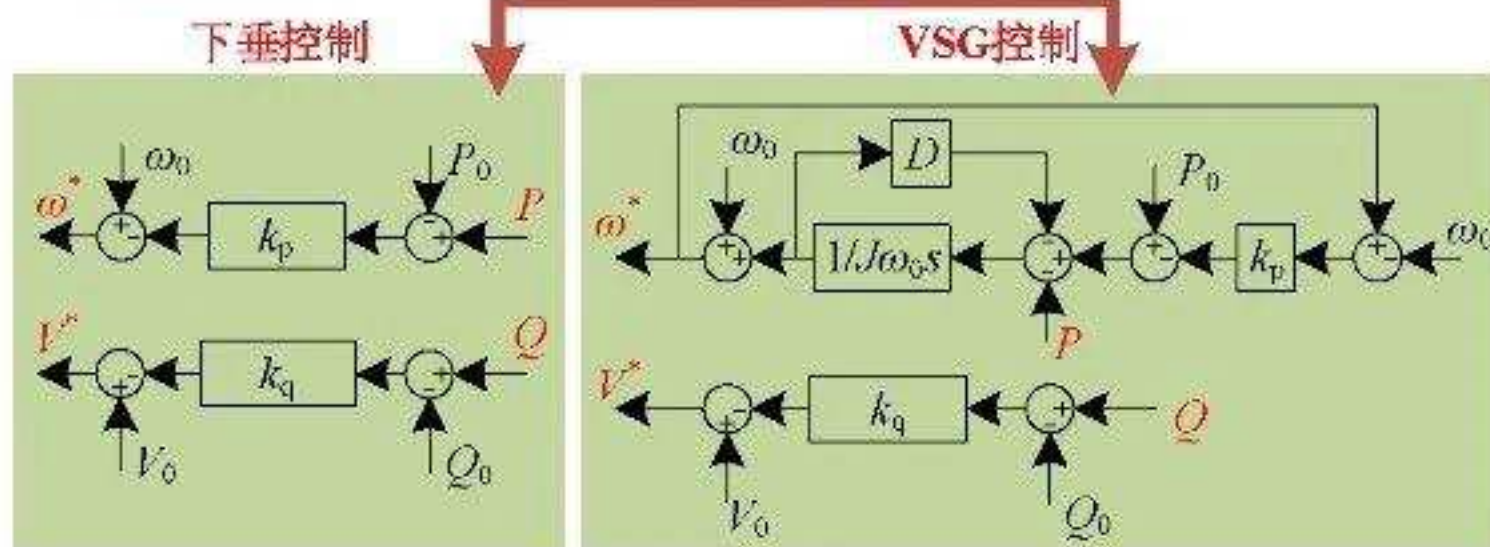
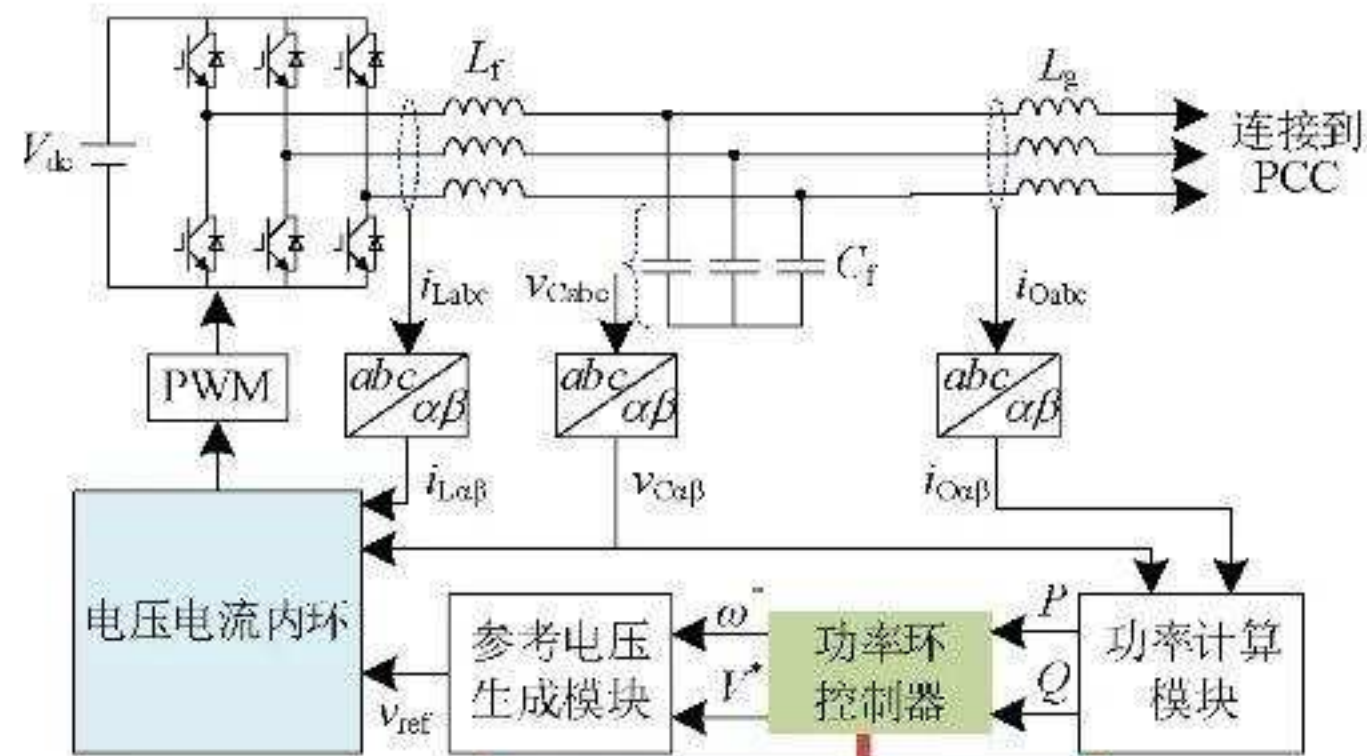
系统架构

■ 构网控制基本原理



☹️ 线路阻抗影响无功谐波
功率分配控制

☹️ 相位频率同步制约母线
电压质量提升



模拟同步发电机外特性，构建P- ω 和Q-V下垂控制

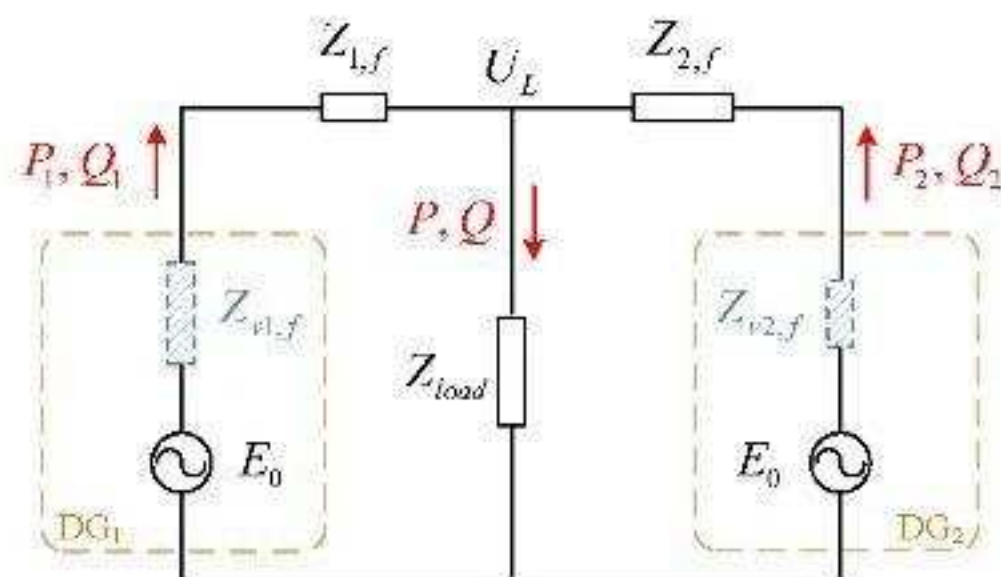


内容提要

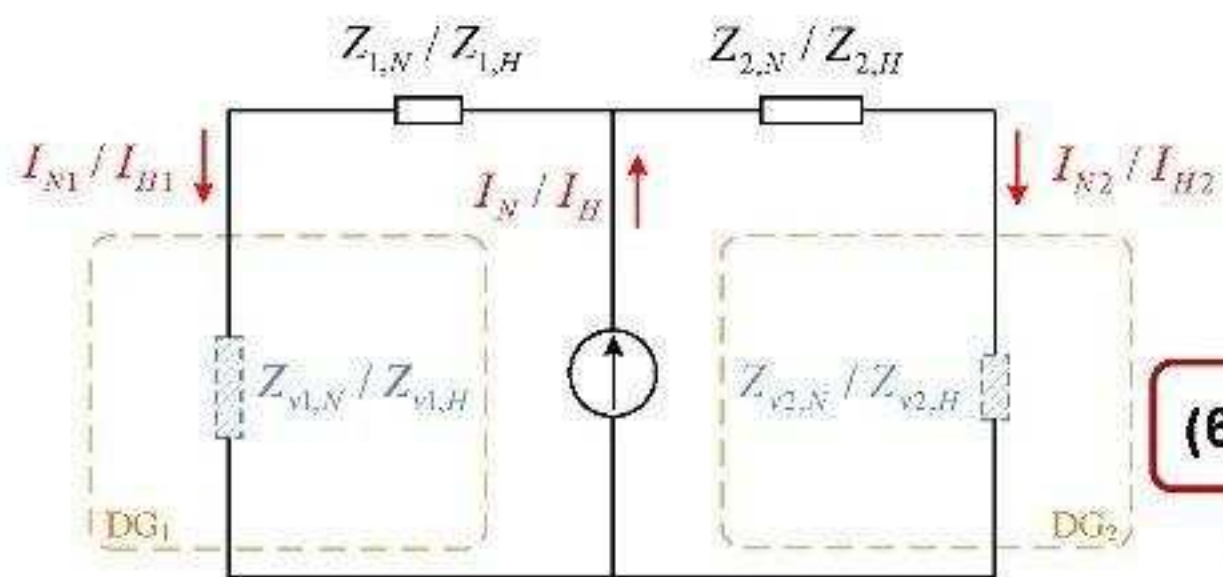
- 研究背景
- 系统架构
- **构网控制技术**
 - 功率分配控制
 - 频率电压控制
- 系统振荡分析
- 结论

功率分配控制

- 问题描述：线路阻抗差异导致无功功率不均分



$$Q_i = \frac{(Z_{i,f} + Z_{vj,f})^{-1}}{\sum_{j=1}^n (Z_{j,f} + Z_{vj,f})^{-1}} Q$$



$$I_{Ni} = \frac{(Z_{i,N} + Z_{vi,N})^{-1}}{\sum_{j=1}^n (Z_{j,N} + Z_{vj,N})^{-1}} I_N$$

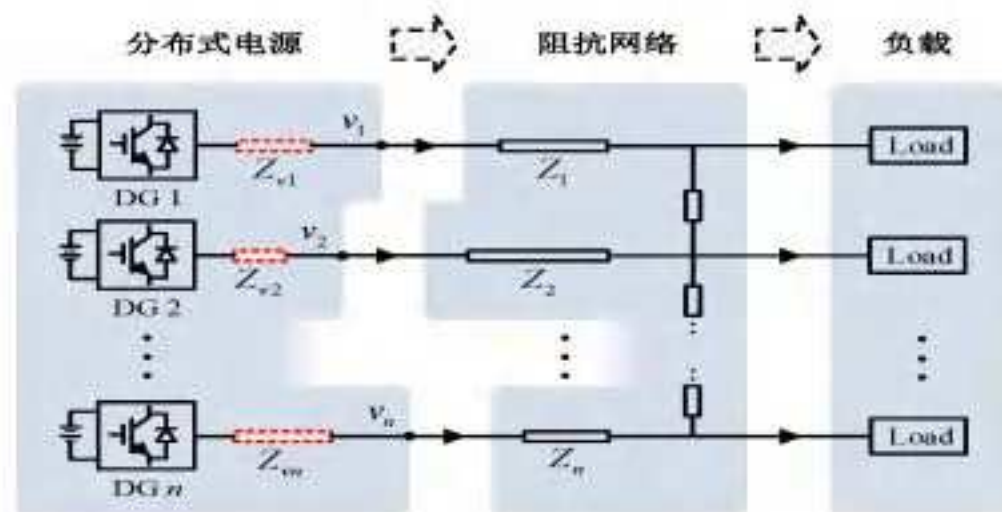
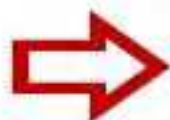
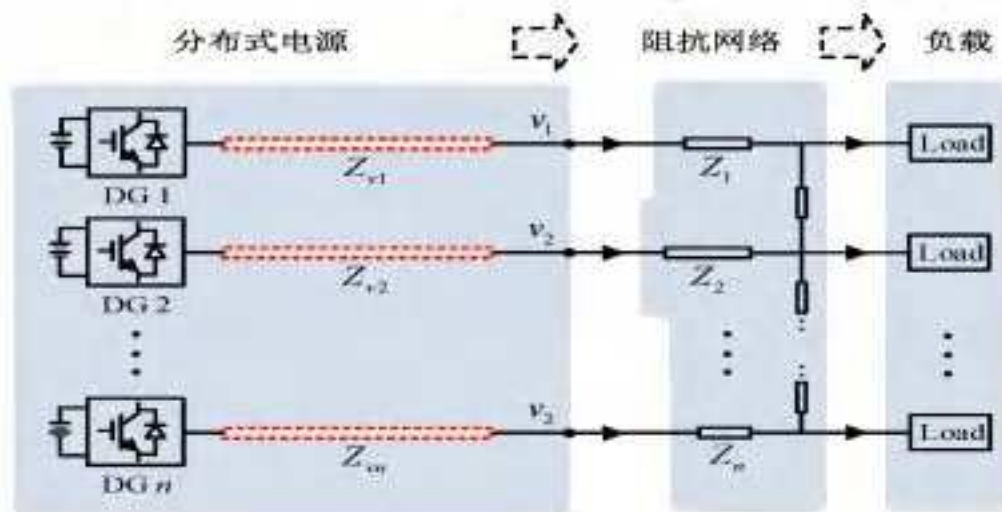
$$I_{Hi} = \frac{(Z_{i,H} + Z_{vi,H})^{-1}}{\sum_{j=1}^n (Z_{j,H} + Z_{vj,H})^{-1}} I_H$$

- 无功、不平衡及谐波功率分配都与**每条支路上的总阻抗成反比**
 - 需在多个目标频率处上加入虚拟阻抗，改善在各个频段功率分配



功率分配控制

基本思路：虚拟阻抗调控



- 传统Q-V下垂控制等效于某种用相同**虚拟阻抗**来降低**支路总阻抗差异**
 - 分配精度与电压质量之间的矛盾
- 采用**不同的虚拟阻抗**来补偿原本线路阻抗差异
 - 功率分配 - 虚拟阻抗差异
 - 电压跌落与THD - 虚拟阻抗平均值



通过合理控制虚拟阻抗，可以实现两个目标之间的解耦

功率分配控制

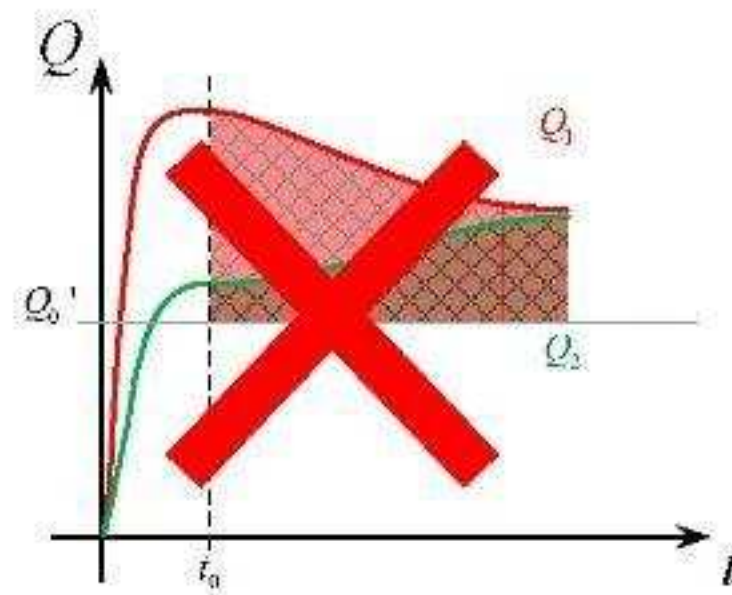
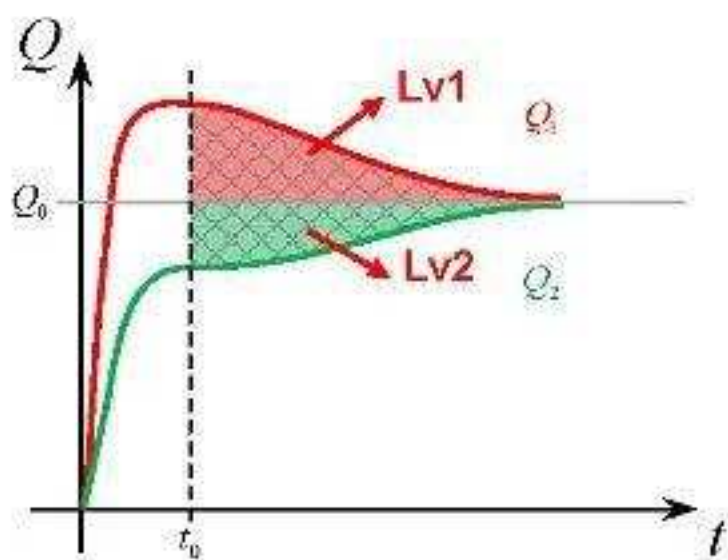
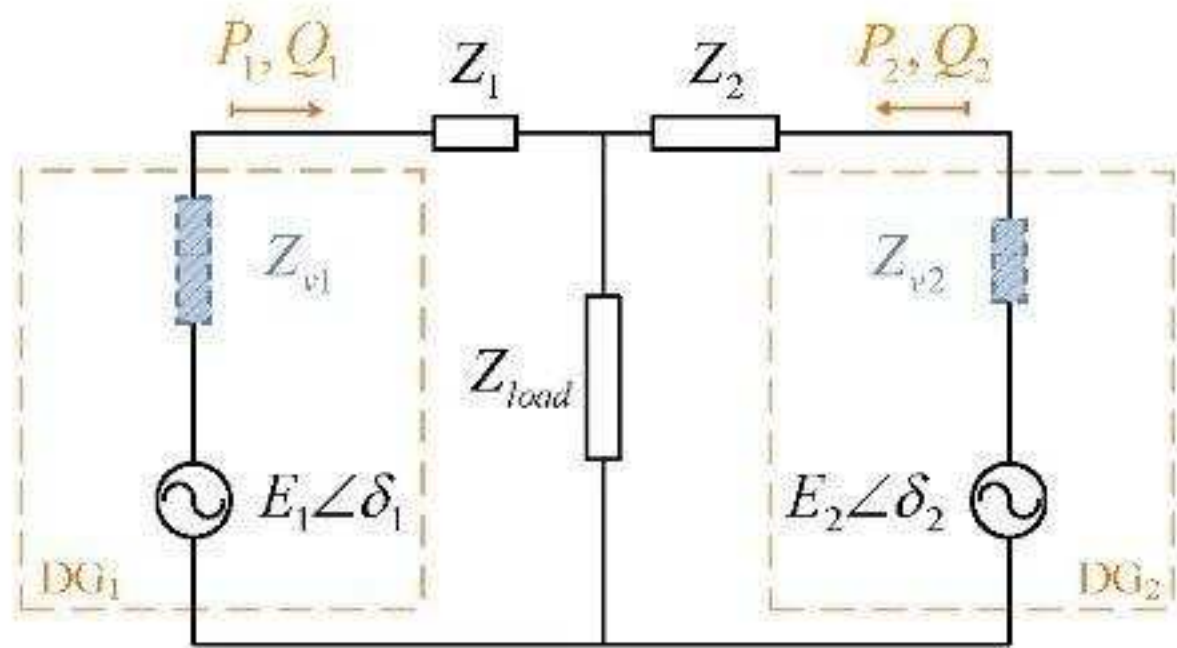
▪ 技术瓶颈：虚拟阻抗调整方向获取

- 假设感性线路阻抗条件下，利用输出无功信息来调节虚拟电感

$$L_v = k_{avi} \int_l (Q - Q_0) d\tau \quad \Rightarrow \quad L_1 + L_{v1} = L_2 + L_{v2}$$

- 可以实现总阻抗一致，从而精确均分无功功率
- 如何控制虚拟电感的值在合理范围之内？

⇒ 依赖负载信息，将 Q_0 设为负载平均值

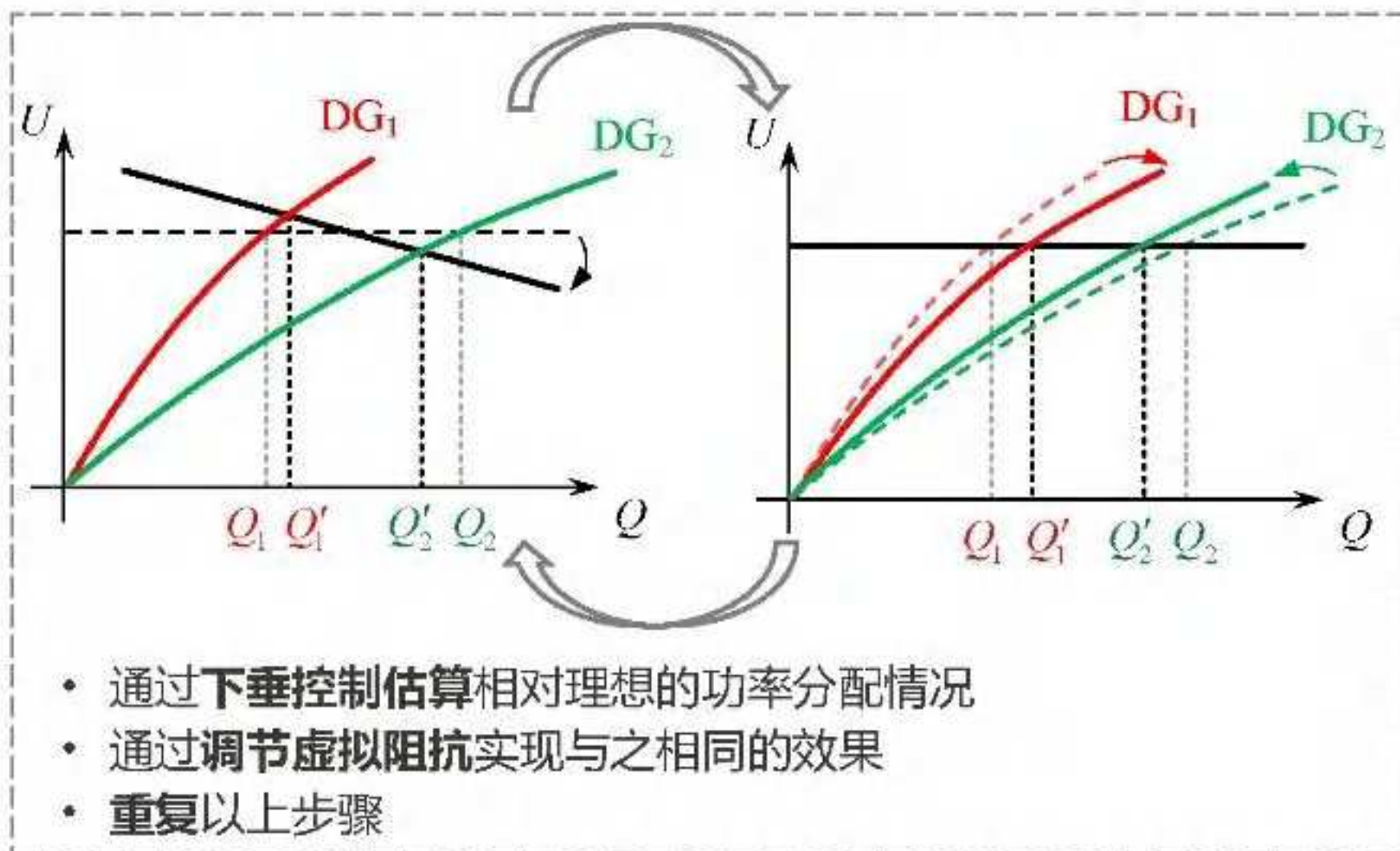
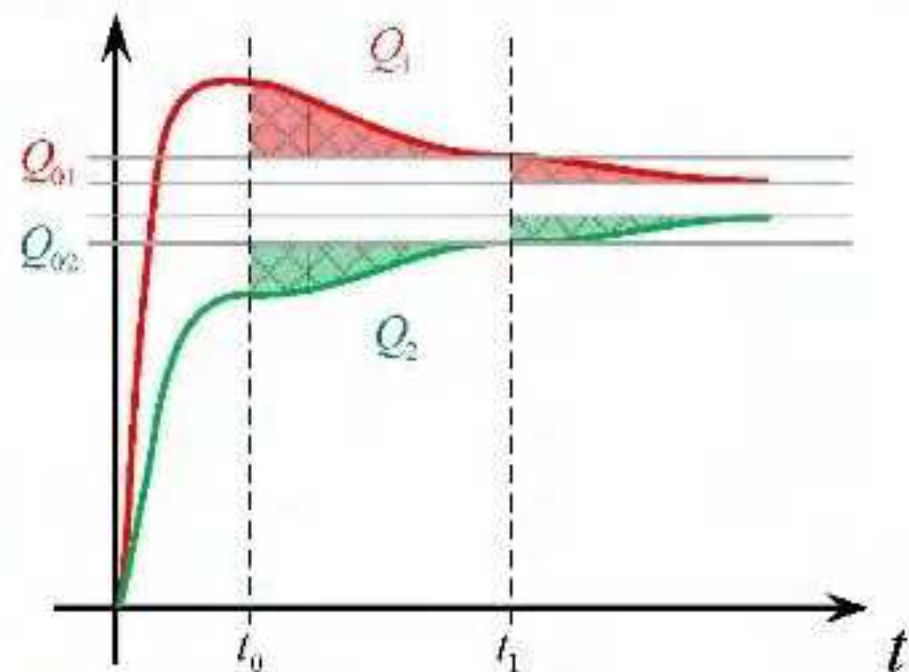
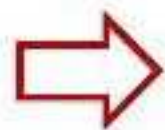




功率分配控制：基于虚拟阻抗逐次逼近的功率分配控制

原理思路：虚拟阻抗逐次逼近

- 常规情况下，平均负载信息需要通过通讯获得
- 如何仅依赖于本地信息获取？



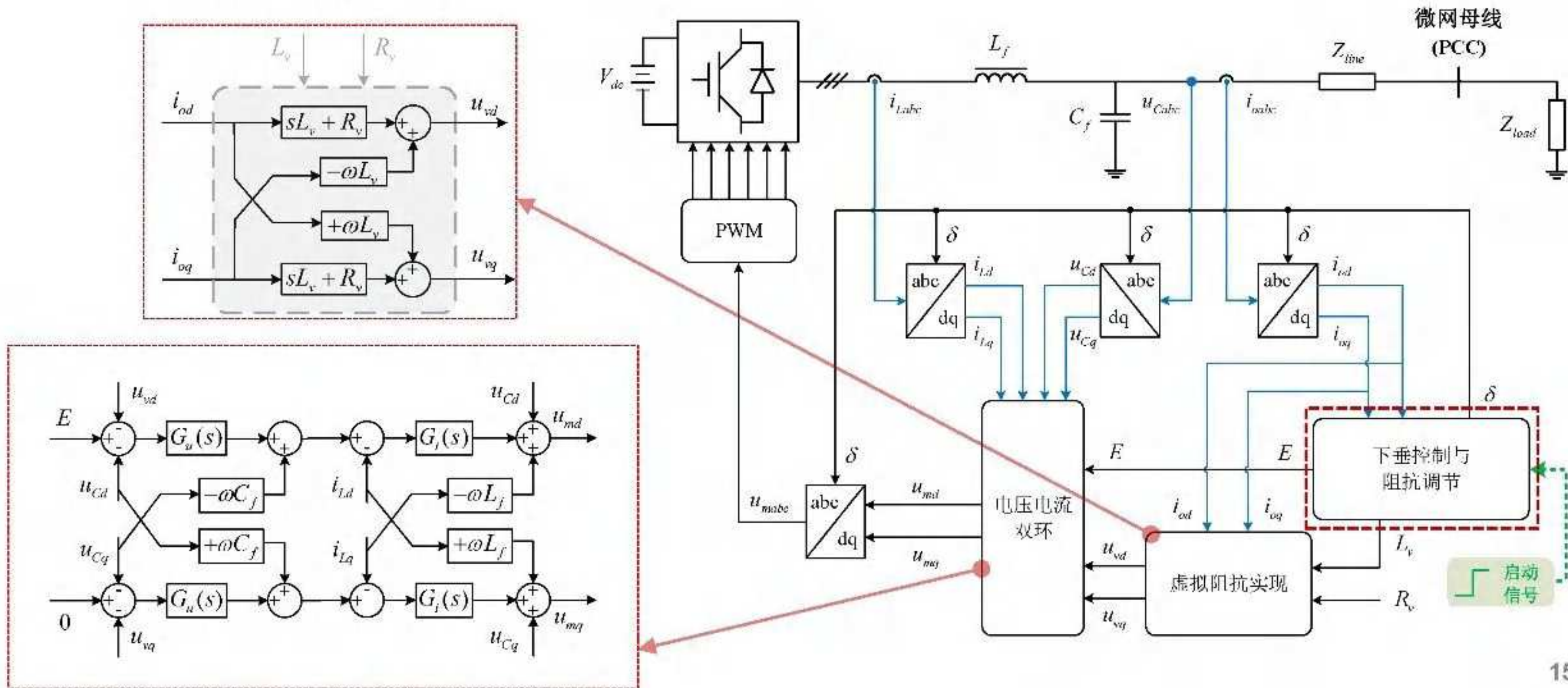
- 各台电源的虚拟阻抗**逐渐逼近合适的最终值**，从而实现理想的功率分配效果
- 最终的虚拟阻抗平均值接近零，有效避免了**额外电压跌落**



功率分配控制：基于虚拟阻抗逐次逼近的功率分配控制



■ 总体控制框图





功率分配控制：基于虚拟阻抗逐次逼近的功率分配控制

■ 阻抗调节方法

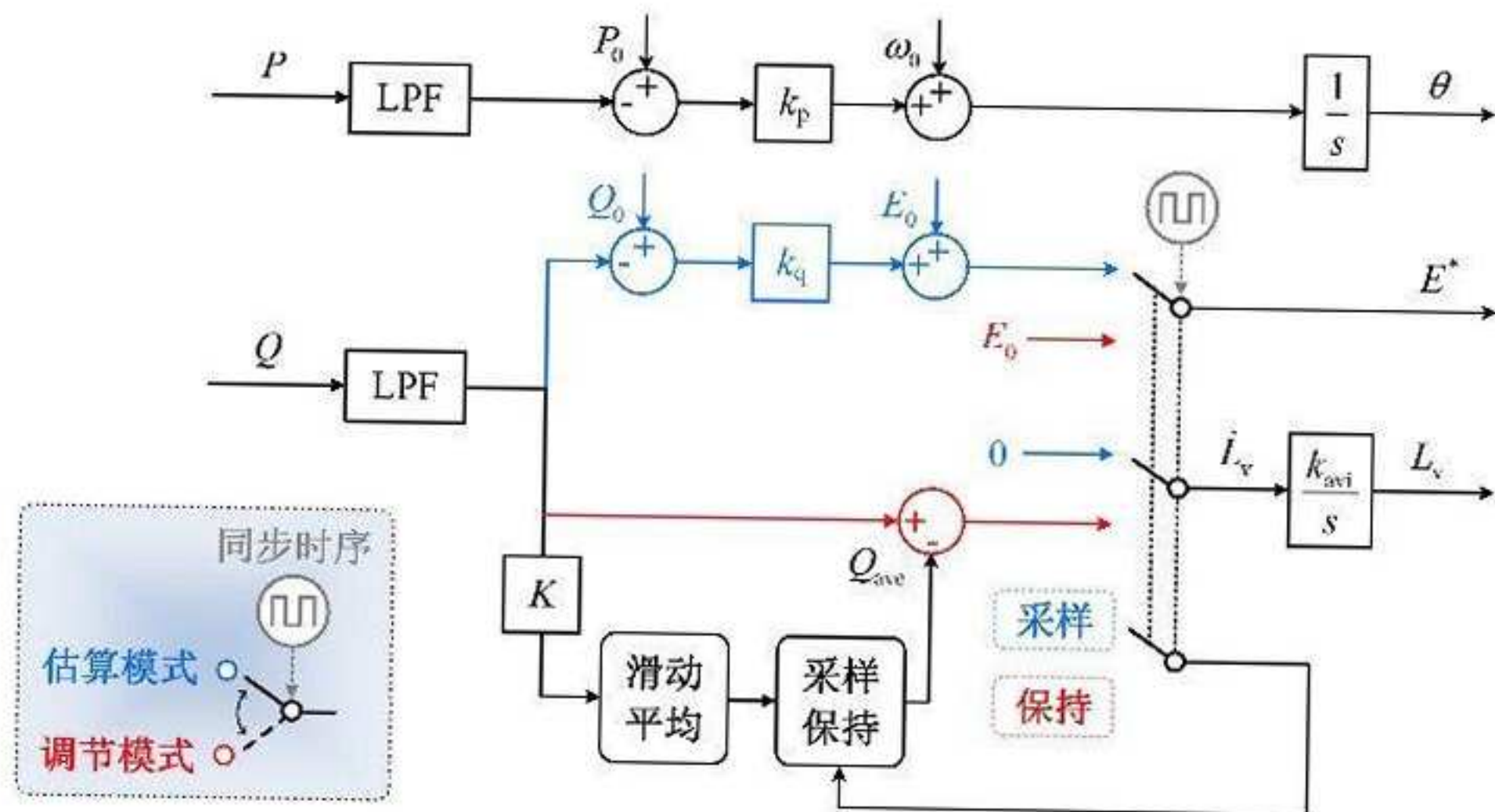
- 估算模式

$$E^* = E_0 - k_q(Q - Q_0)$$

- 调节模式

$$\Delta L_v = \frac{k_{avi}}{s}(Q - KQ_{ave})$$

- 下垂模式**估算**负载状况，并通过采样进行保持
- 调节虚拟阻抗逐渐**逼近**下垂控制功率分配效果

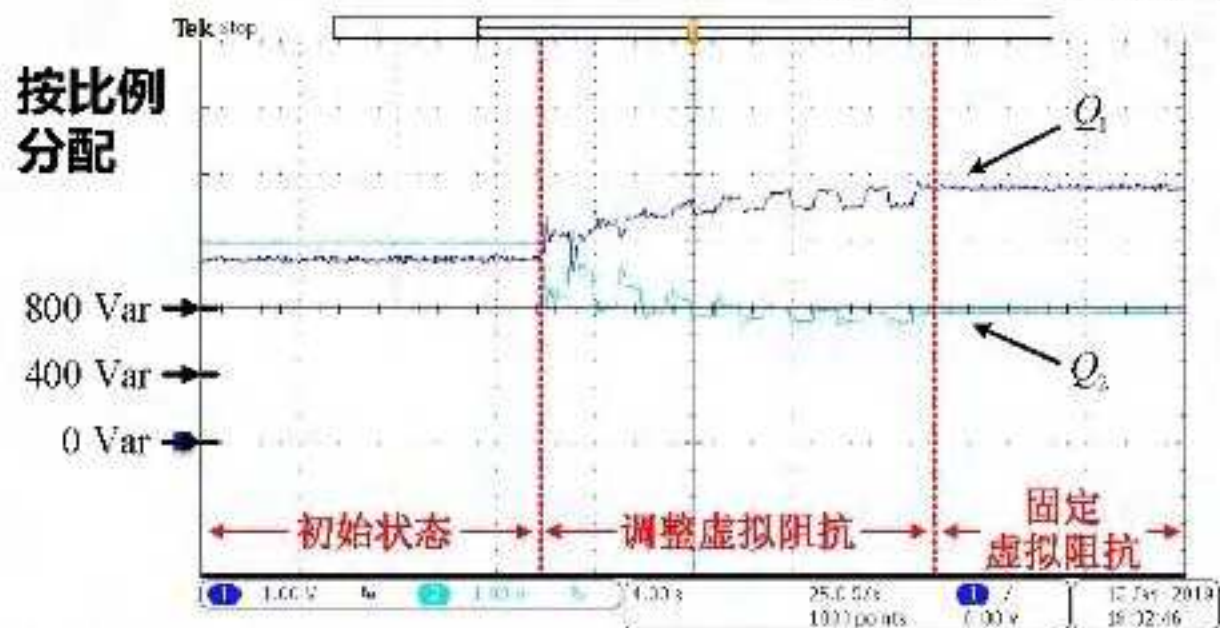
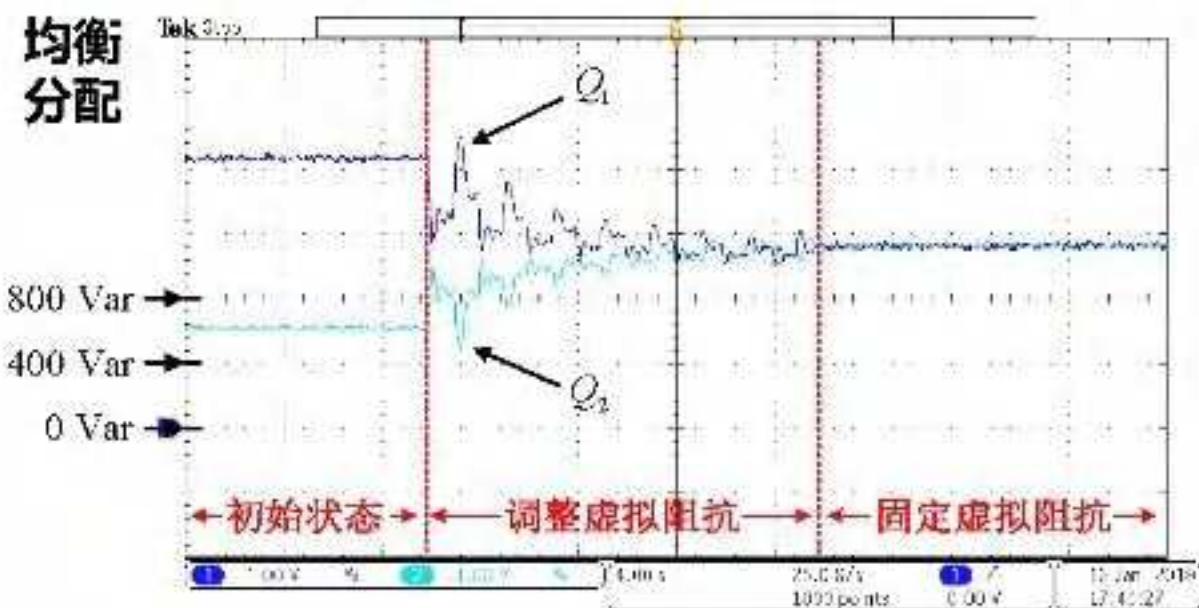




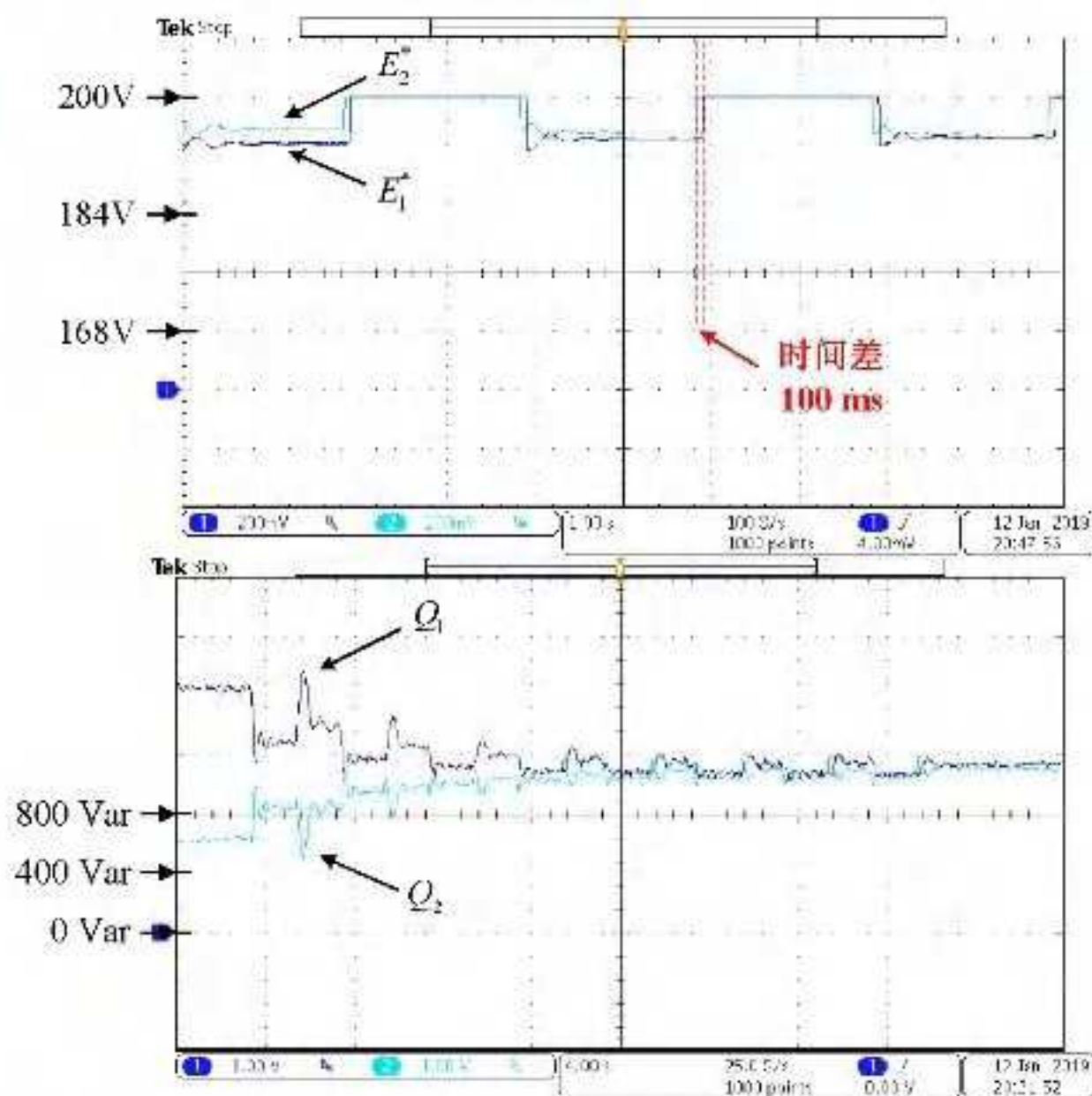
功率分配控制：基于虚拟阻抗逐次逼近的功率分配控制

实验验证

典型控制效果

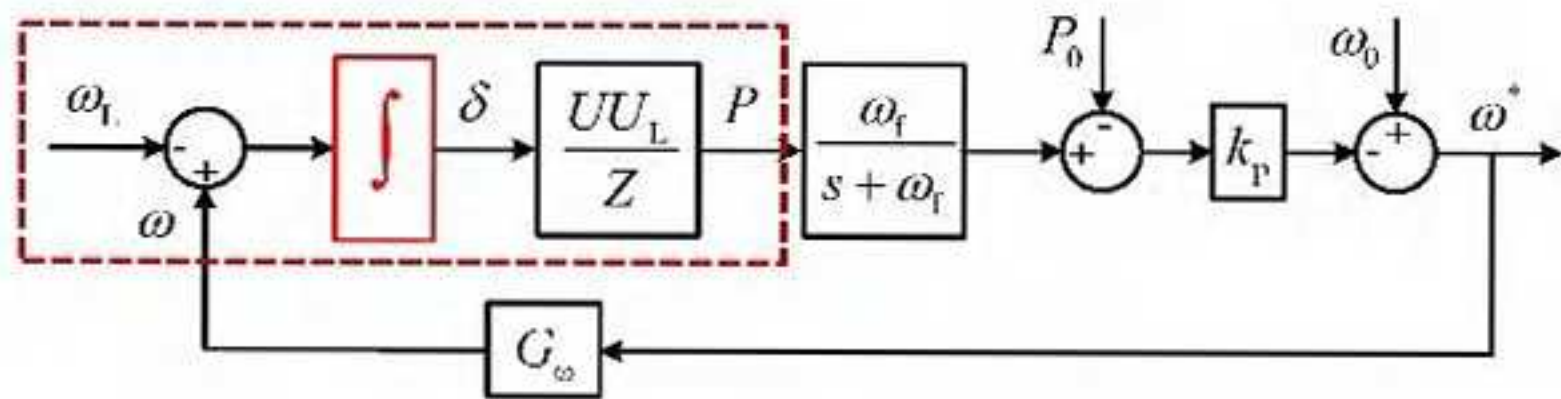
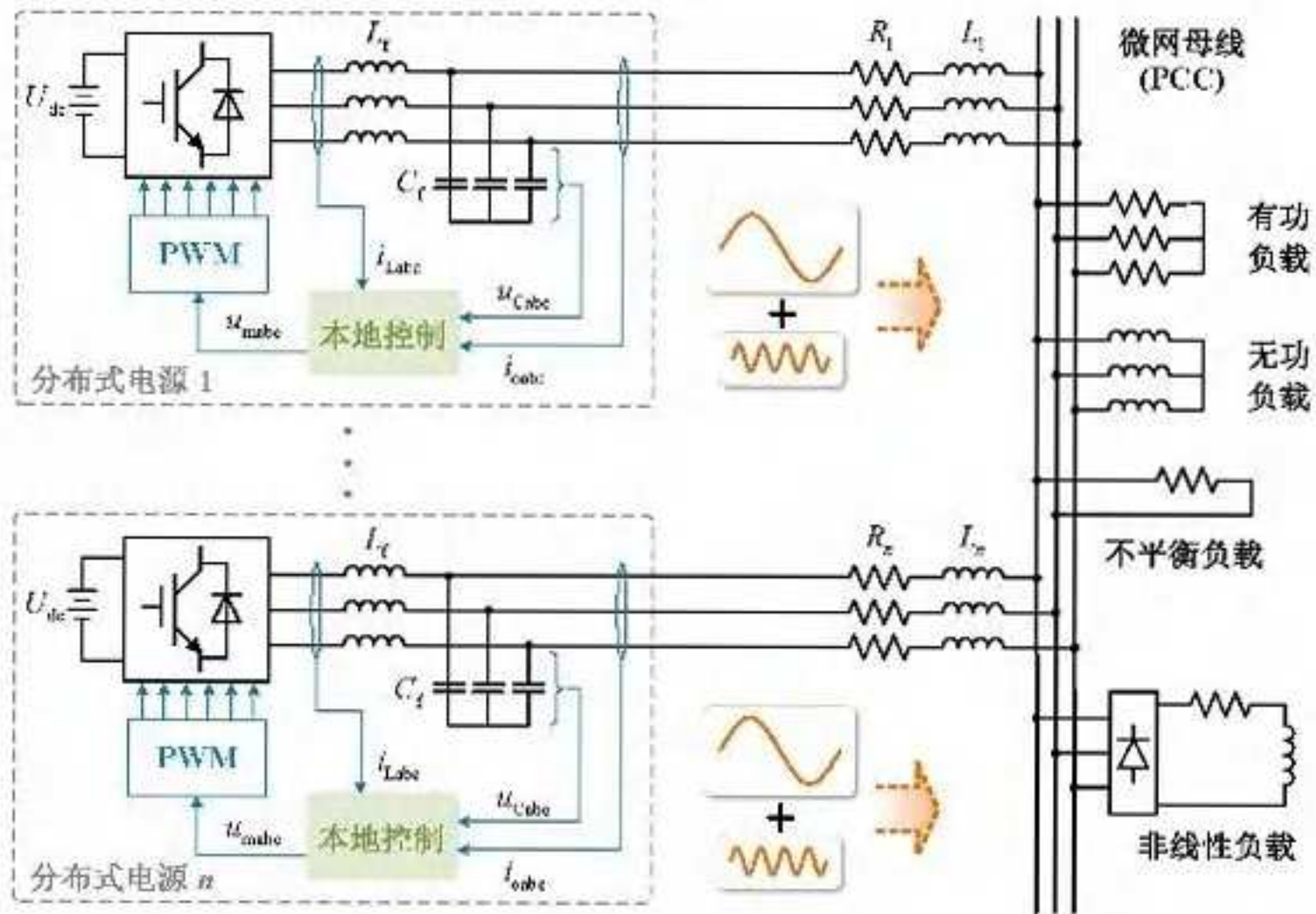


时序延迟时控制效果



功率分配控制：基于交流小信号同步的功率分配控制

原理思路

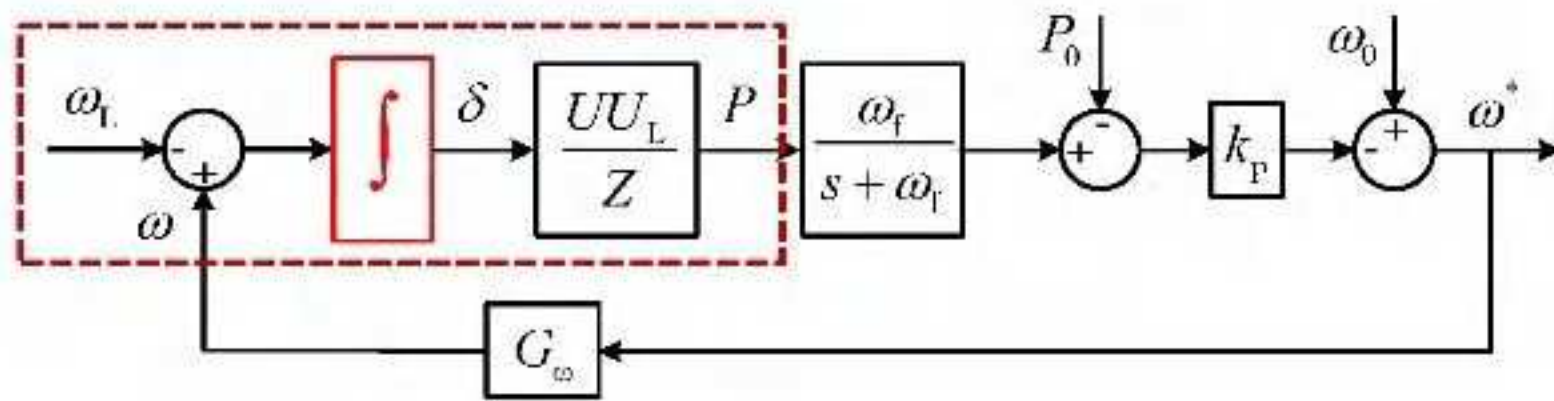
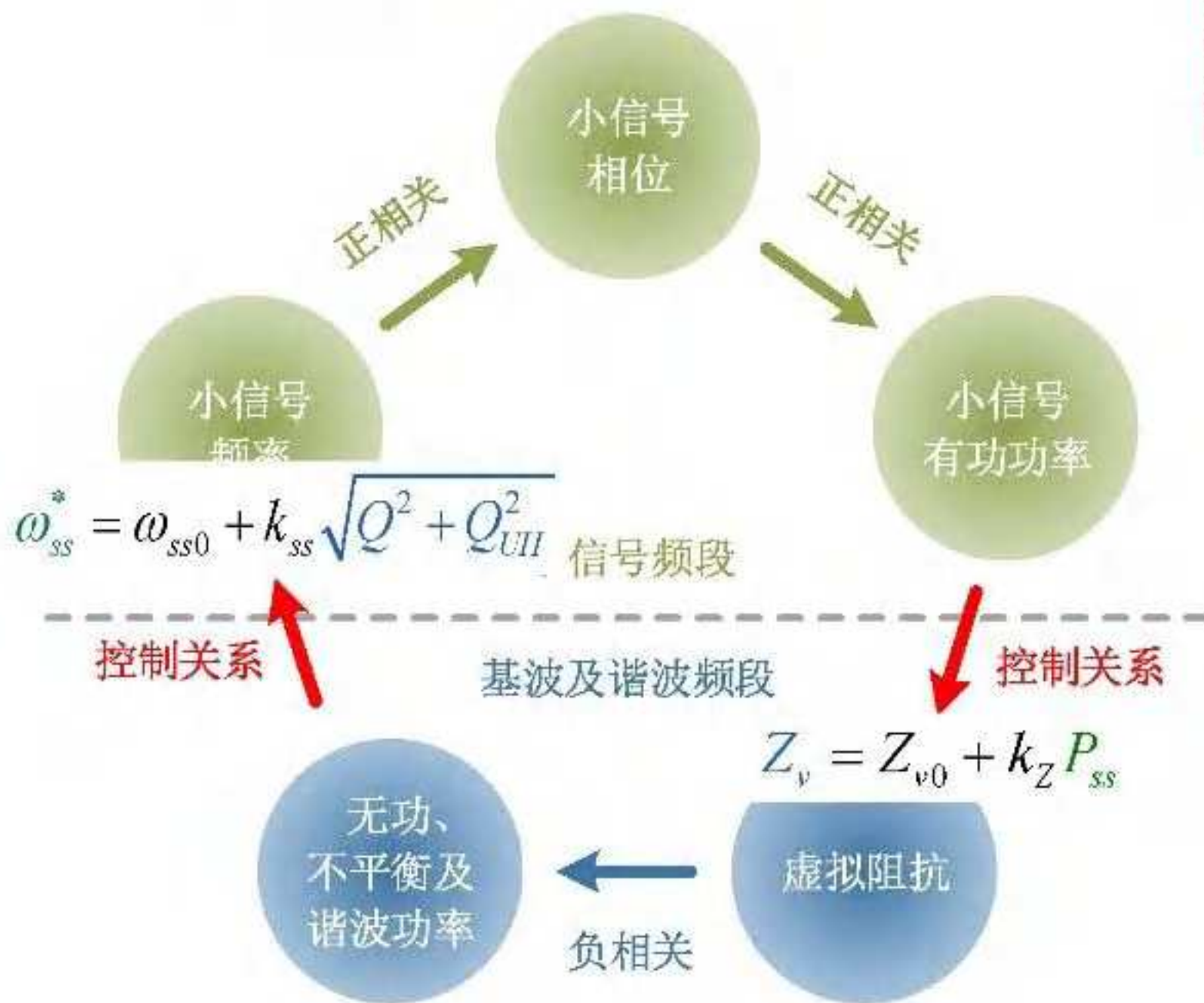


- P - ω 下垂控制借助于基波频率与有功功率关系，构造相应的下垂控制关系来实现有功功率的均分
- 注入另一个小交流信号？
 - 自动同步 & 频率全局一致性
- 结合虚拟阻抗对各项功率的控制作用
- 构建合理的控制关系，形成闭环负反馈
 - 小信号频率一致性确保目标功率的分配
 - 小信号作为某种形式的沟通媒介，免于通讯



功率分配控制：基于交流小信号同步的功率分配控制

原理思路

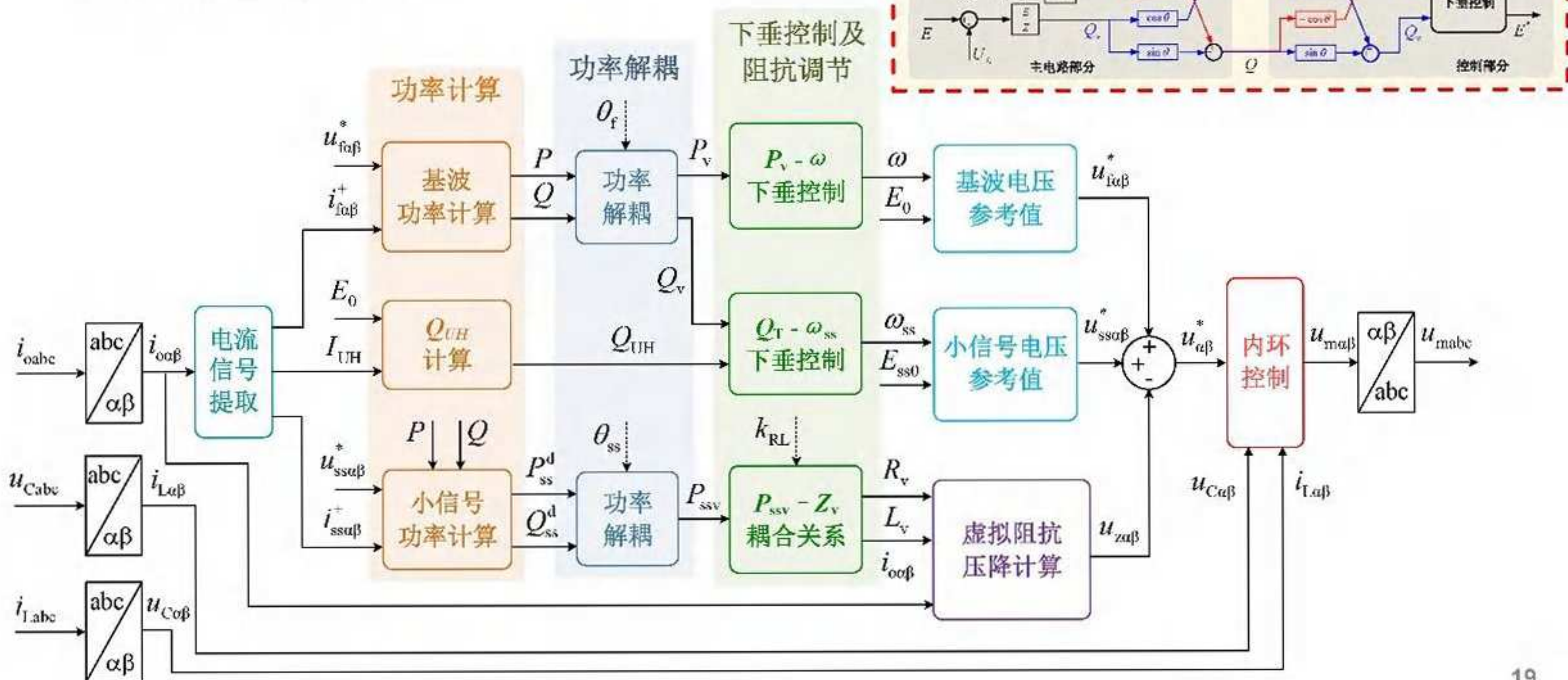


- P - ω 下垂控制借助于基波频率与有功功率关系，构造相应的下垂控制关系来实现有功功率的均分
- 注入另一个小交流信号？
 - 自动同步 & 频率全局一致性
- 结合虚拟阻抗对各项功率的控制作用
- 构建合理的控制关系，形成闭环负反馈
 - **小信号频率一致性确保目标功率的分配**
 - 小信号作为某种形式的**沟通媒介**，免于通讯



功率分配控制：基于交流小信号同步的功率分配控制

总体控制架构

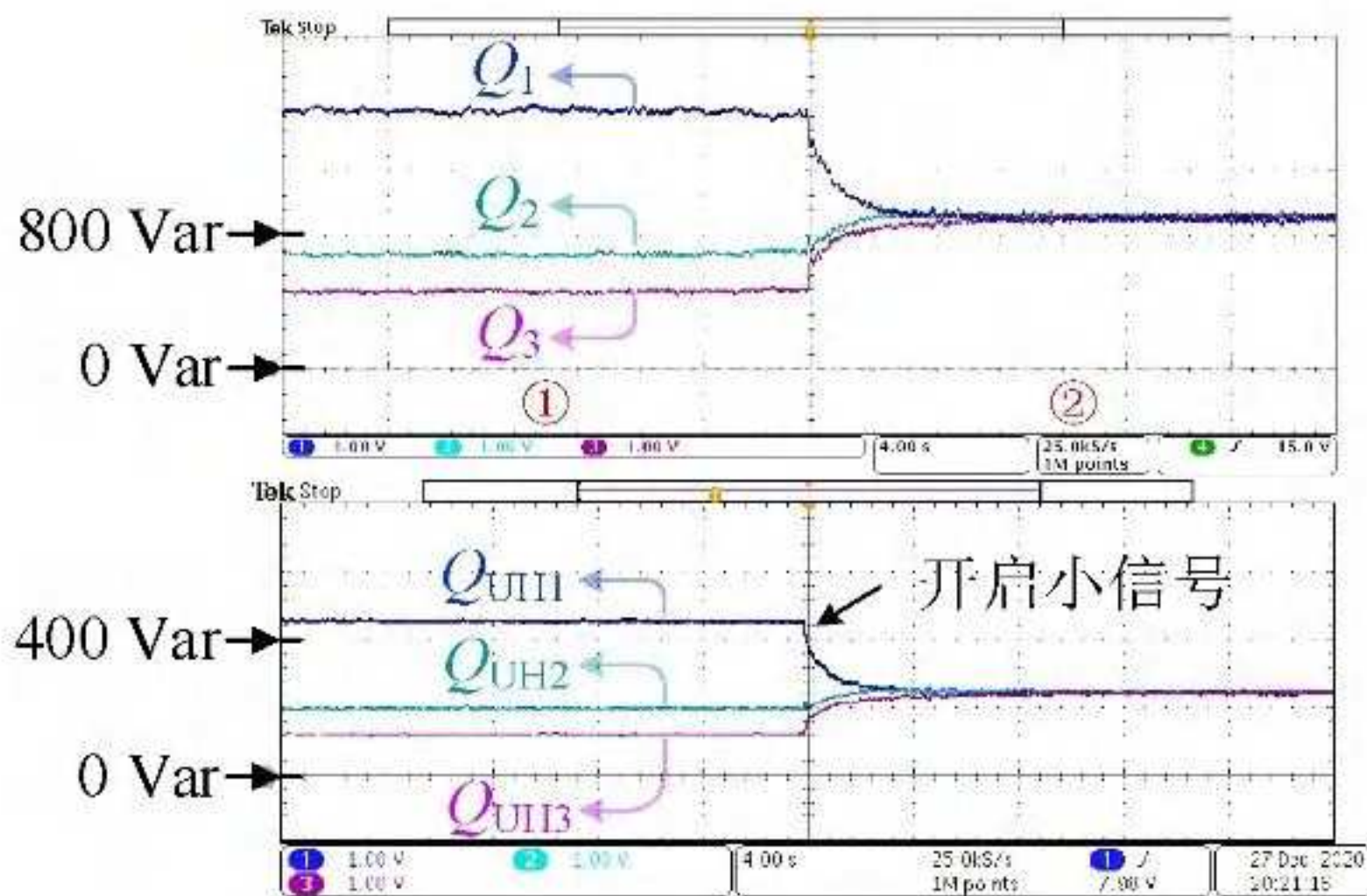




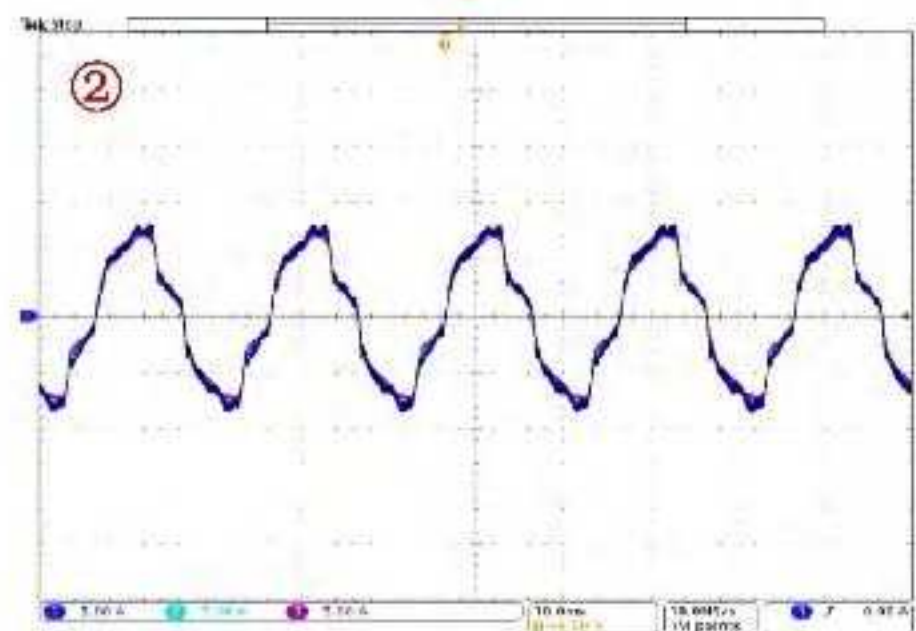
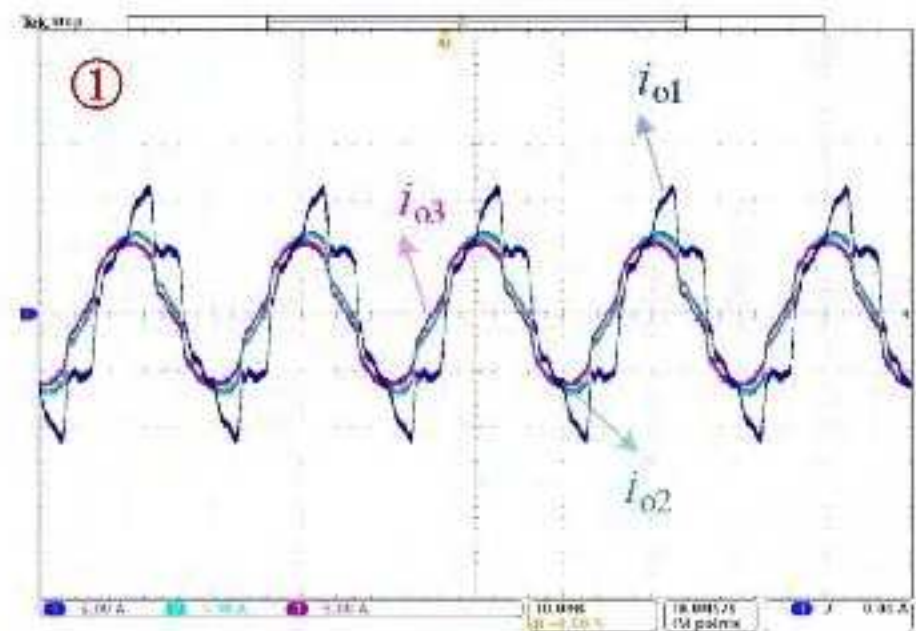
功率分配控制：基于交流小信号同步的功率分配控制



实验验证：功率均衡分配



无功、不平衡及谐波功率



输出电流

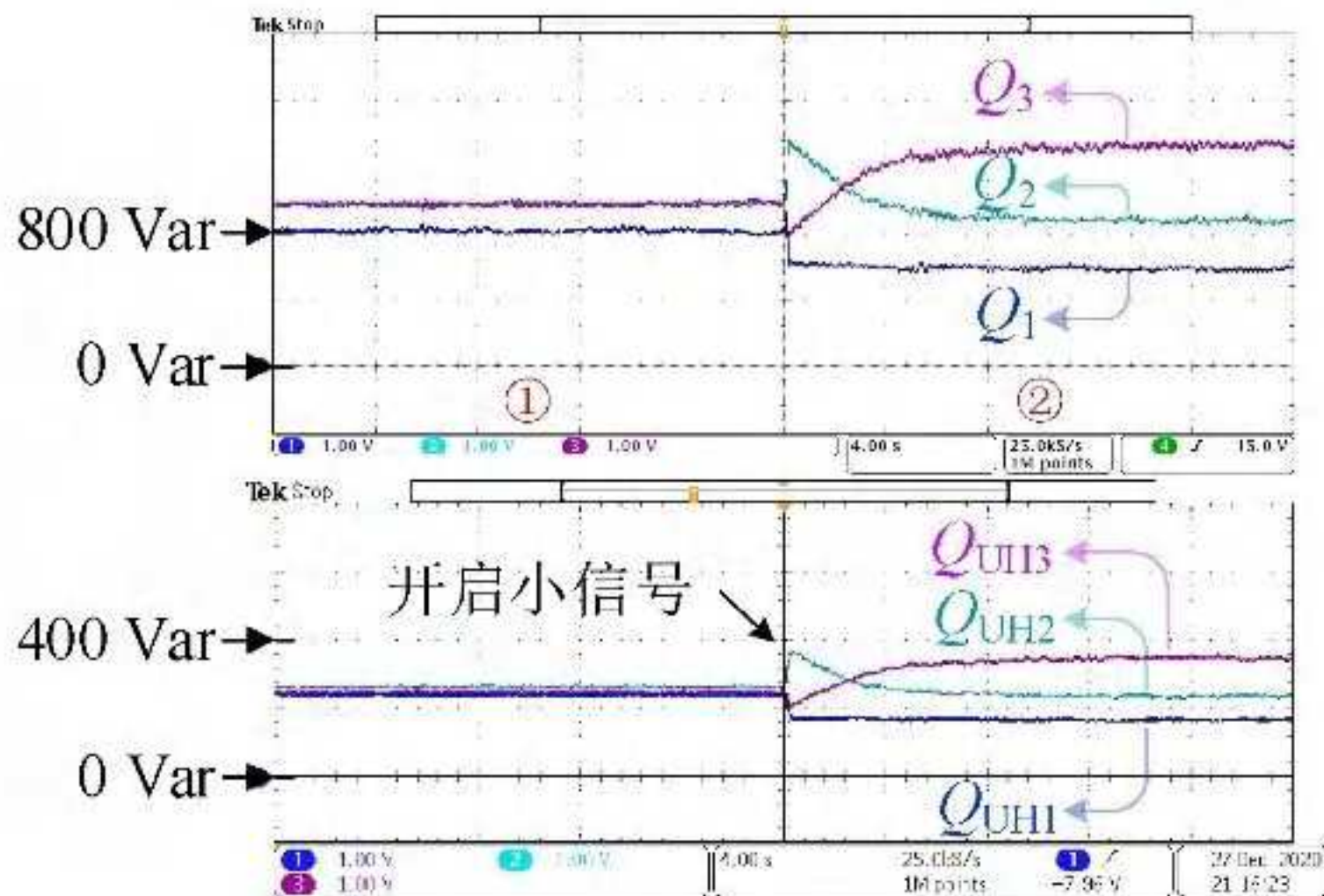


功率分配控制：基于交流小信号同步的功率分配控制

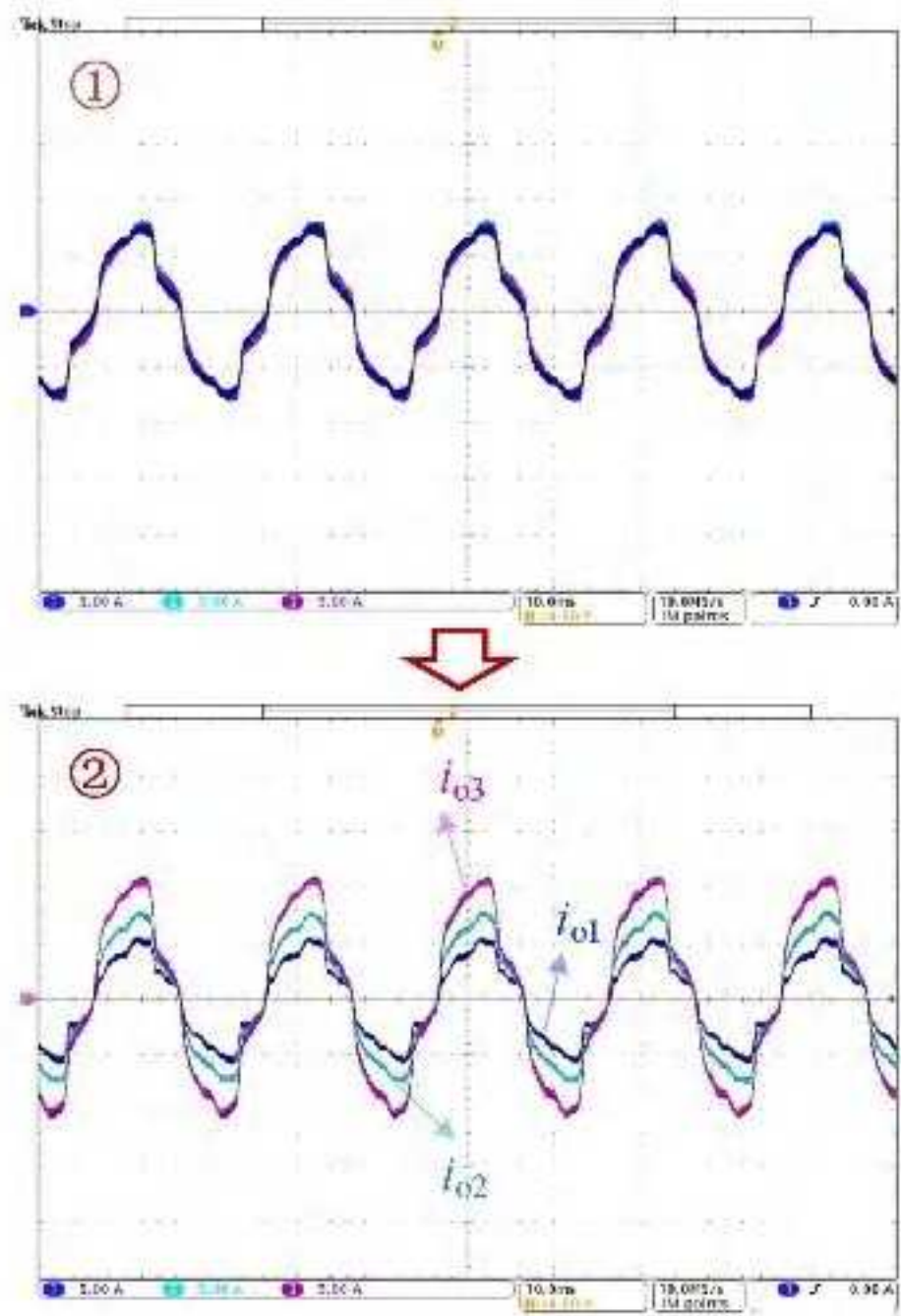


实验验证：功率按比例分配

- 各项功率按照 4 : 6 : 9 分配



无功、不平衡及谐波功率



输出电流



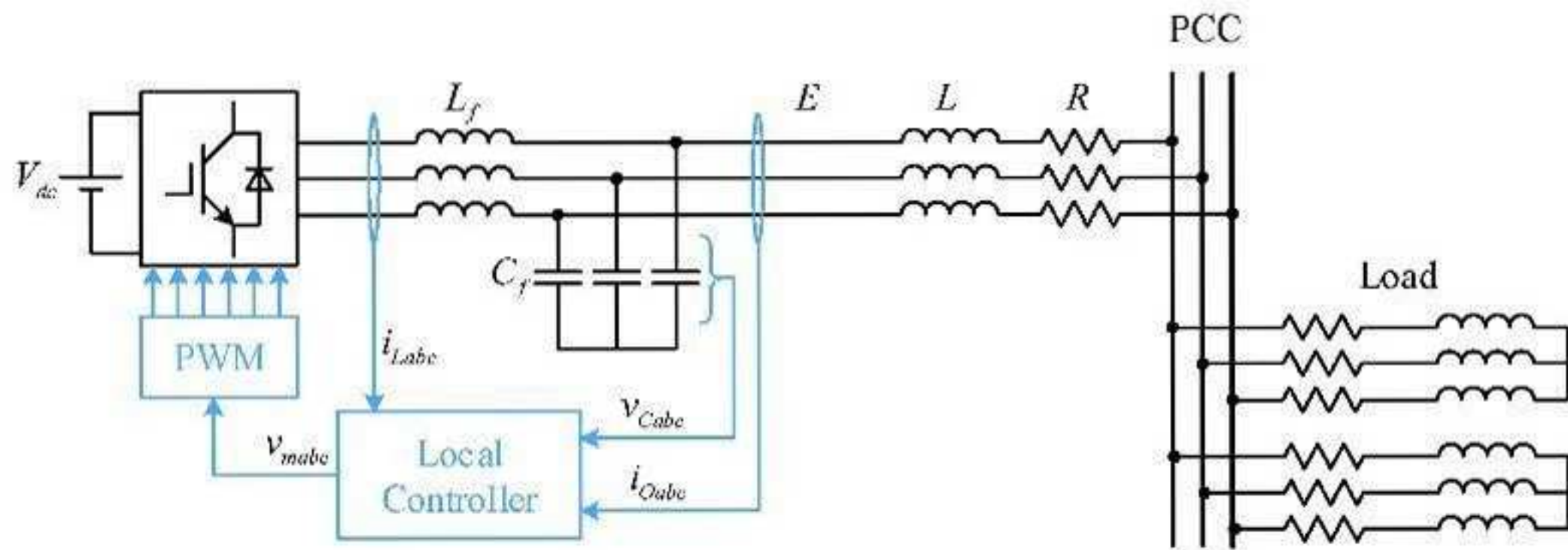
内容提要

- 研究背景
- 系统架构
- 构网控制技术
 - 功率分配控制
 - **频率电压控制**
- 系统振荡分析
- 结论



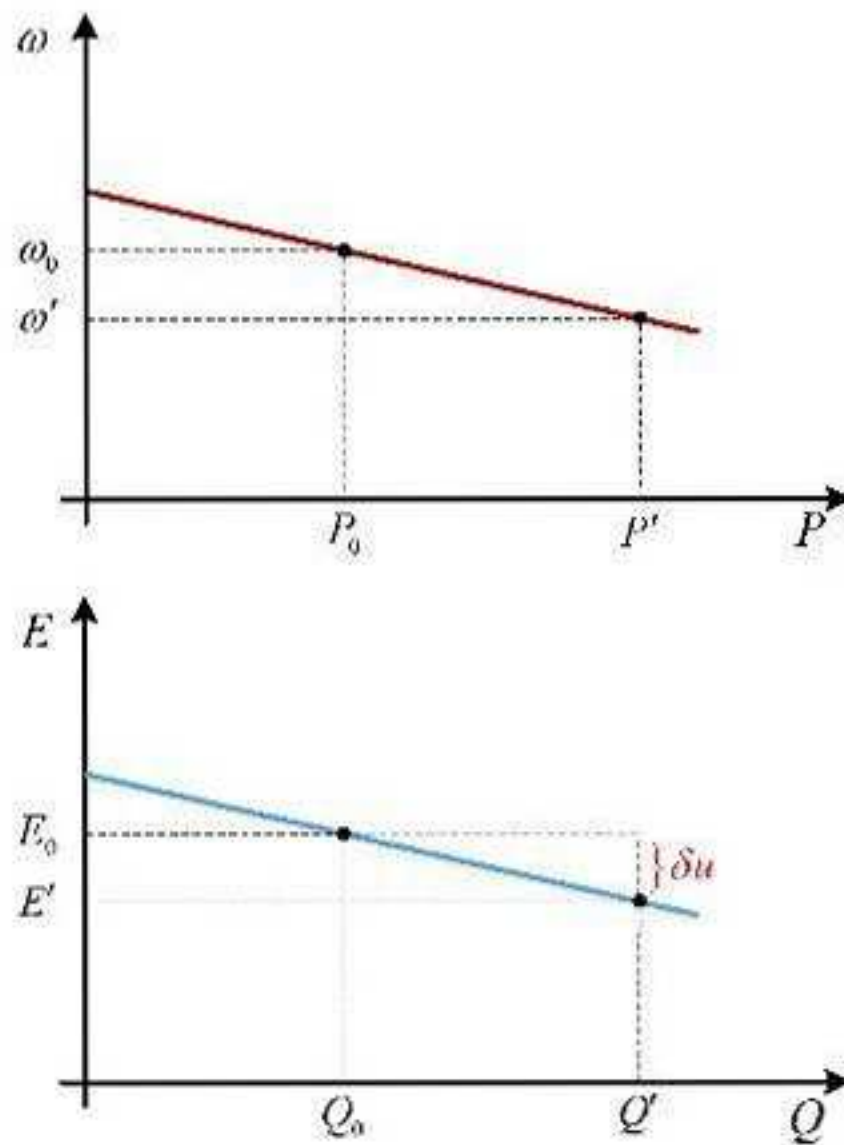
频率电压控制

▪ 频率电压二次控制必要性



$$\omega^* = \omega_0 - m(P - P_0)$$

$$E^* = E_0 - n(Q - Q_0) + \delta u$$

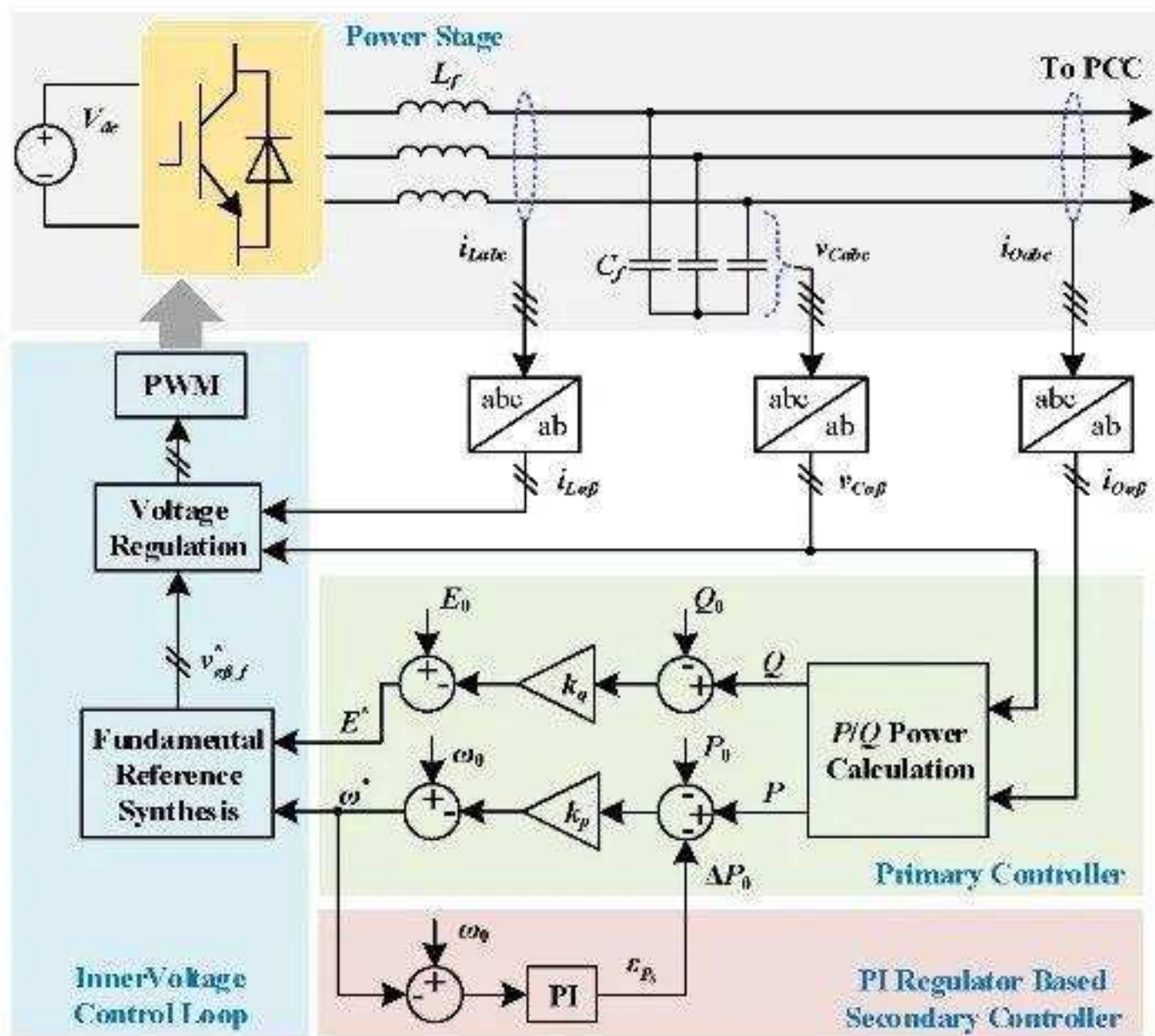


- 负载变化将引起的系统频率和电压偏离额定值
- 二次控制将补偿该偏差以保证供电质量



频率电压控制

传统基于PI控制器的频率二次控制

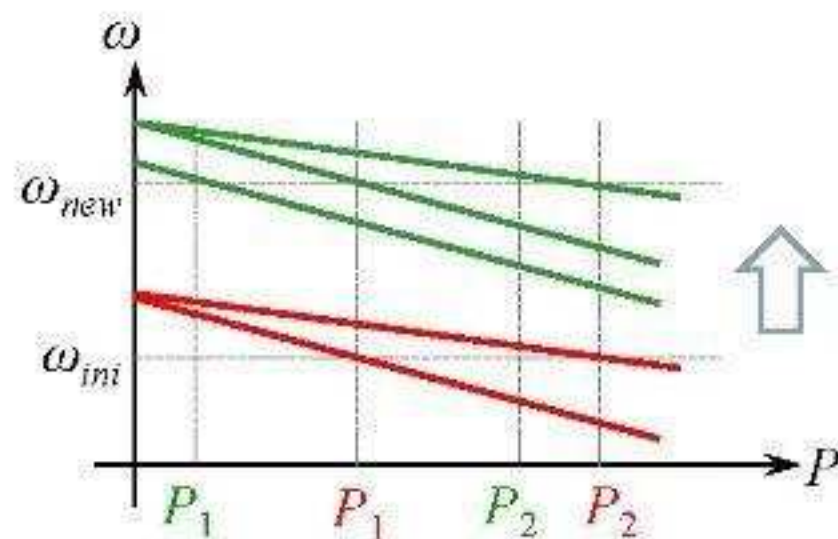


$$\omega^* = \omega_0 - k_p (P - P_0 - \Delta P_0)$$

$$\Delta P_0 = \varepsilon_{P_0}$$

$$\varepsilon_{P_0} = \left(k_{p\omega} + \frac{k_{i\omega}}{s} \right) (\omega_0 - \omega^*)$$

调节过程中有功功率补偿量不一致会导致不平衡的有功功率分配





频率电压控制：基于交流小信号同步的频率二次控制

基本原理

- 基波频段采用传统下垂控制

$$\omega^* = \omega_0 - k_p (P - P_0 - \Delta P_0)$$

$$E^* = E_0 - k_q (Q - Q_0)$$

- 小信号频率与额定有功功率的补偿量建立下垂关系

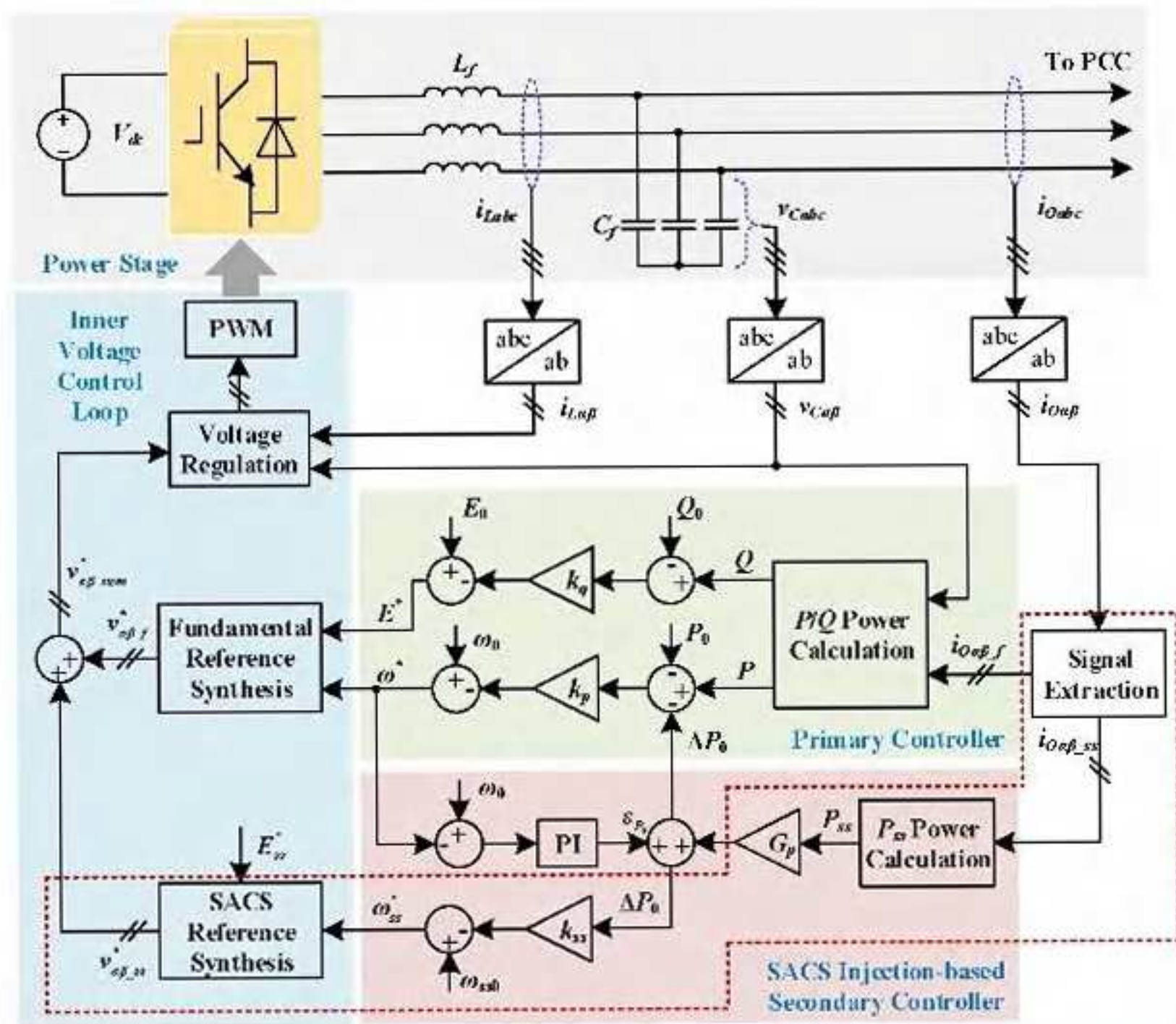
$$\omega_{ss}^* = \omega_{ss(0)} - k_{ss} \Delta P_0$$

- 额定有功功率的补偿量由小信号电压的有功功率和PI控制器输出的频率补偿量组成

$$\varepsilon_{P_0} = \left(k_{p\omega} + \frac{k_{i\omega}}{s} \right) (\omega_0 - \omega^*)$$

$$\Delta P_0 = \varepsilon_{P_0} + G_p P_{ss}$$

- ☺ 基波频率可以完全恢复
- ☺ 有功功率可以均分



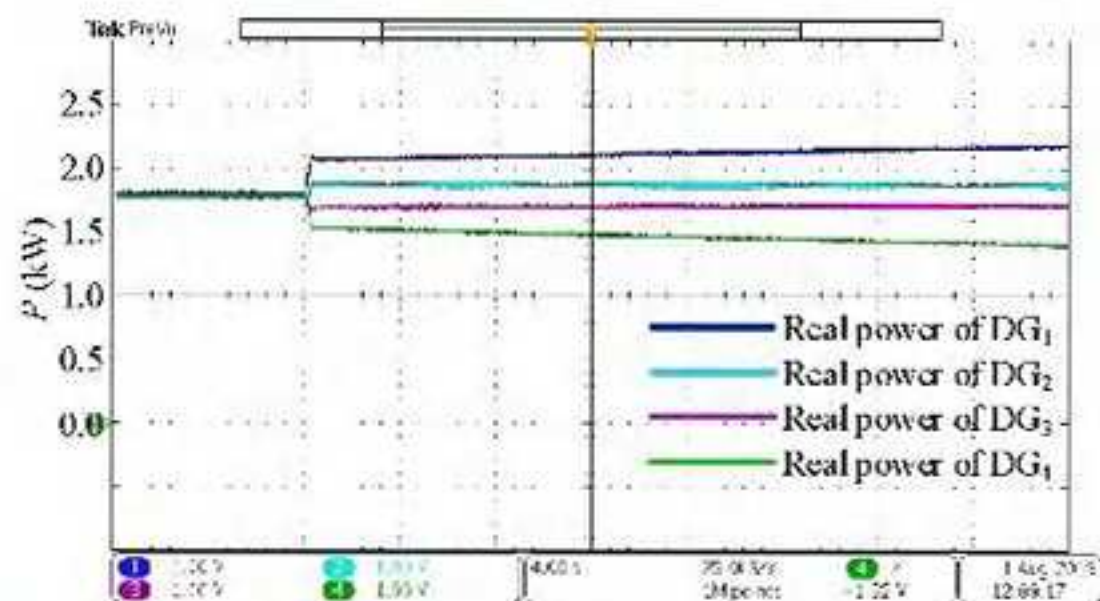
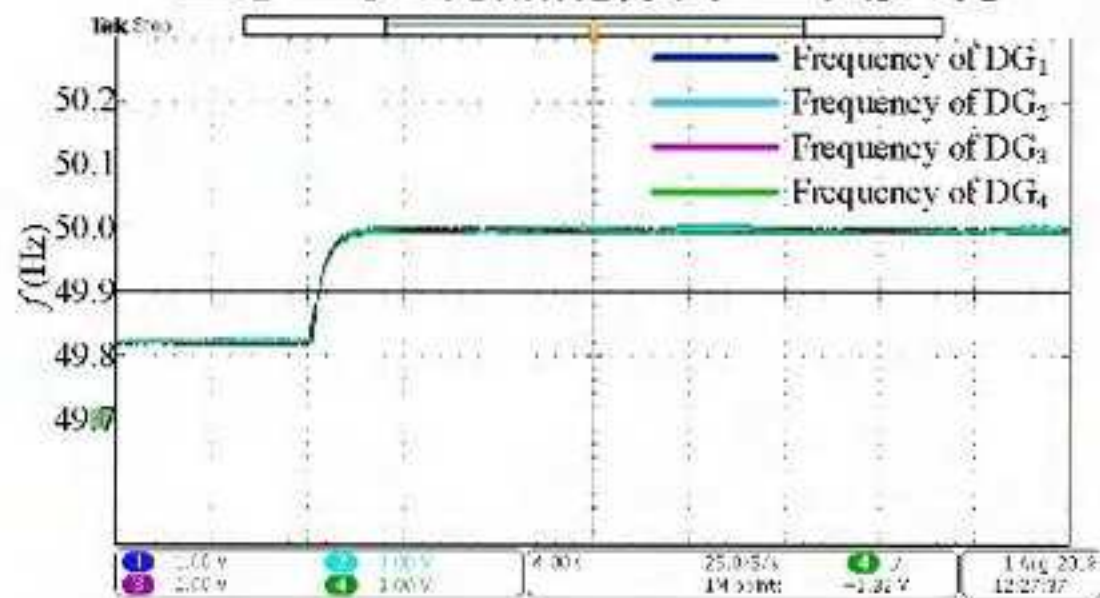


频率电压控制：基于交流小信号同步的频率二次控制

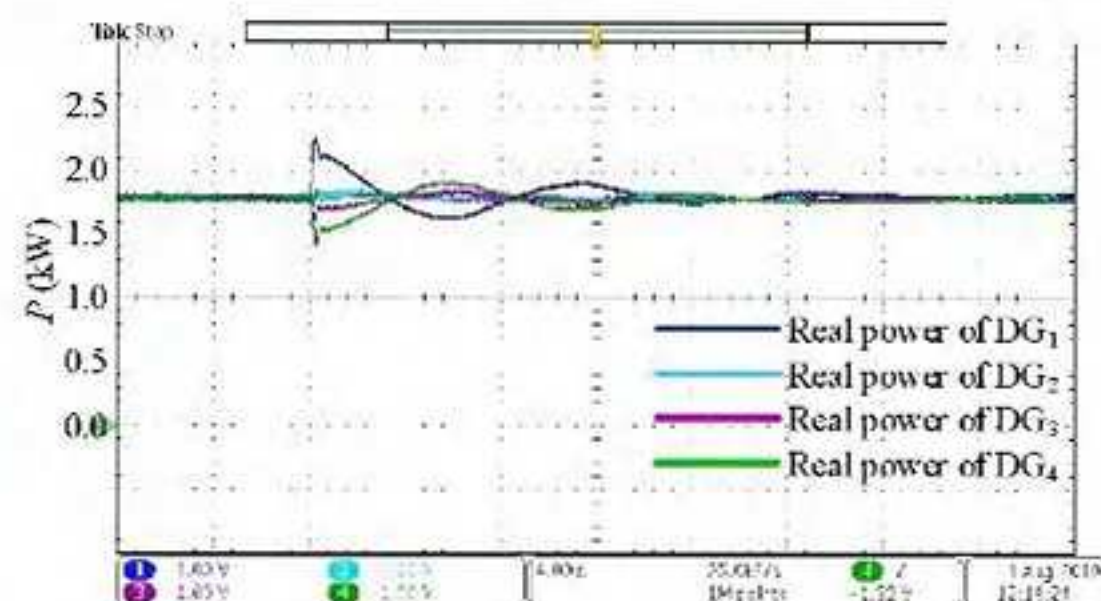
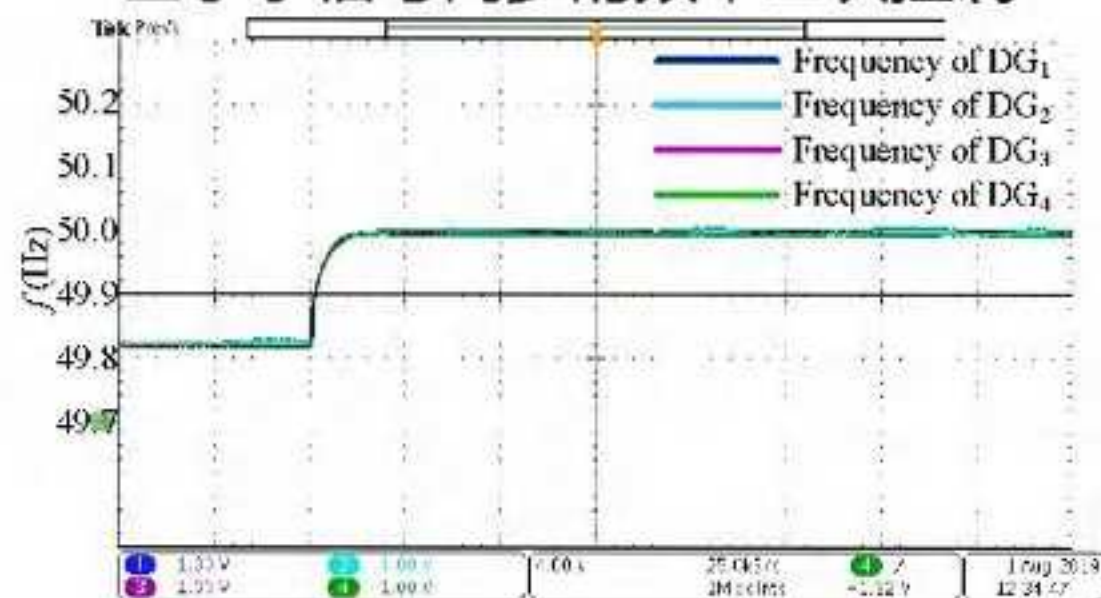


实验结果

基于PI控制器的频率二次控制



基于小信号同步的频率二次控制





频率电压控制

传统基于PI控制器的电压二次控制

- PCC电压由已知的线路阻抗信息进行估算

$$\begin{bmatrix} u_{PCCEst\alpha} \\ u_{PCCEst\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{C\alpha} \\ v_{C\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & -\omega L \\ \omega L & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{O\alpha} \\ i_{O\beta} \end{bmatrix}$$

$$U_{PCCEst} = \sqrt{u_{PCCEst\alpha}^2 + u_{PCCEst\beta}^2}$$

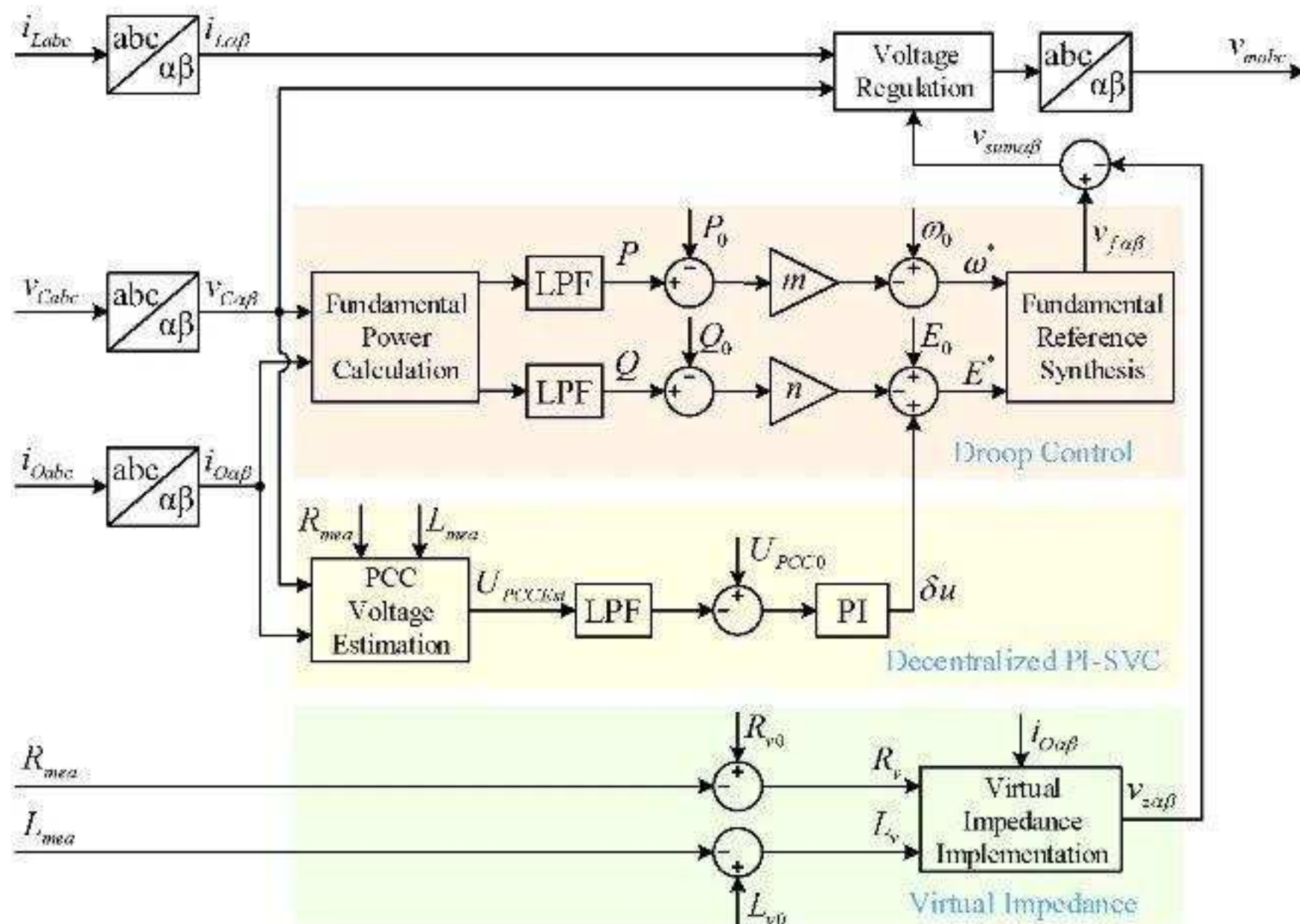
- 电压补偿量由PI控制器产生

$$E^* = E_0 - n(Q - Q_0)$$

$$\delta u = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \left(U_{PCC0} - \frac{\omega_c}{s + \omega_c} U_{PCCEst}\right)$$

☺ PCC电压可以精确恢复

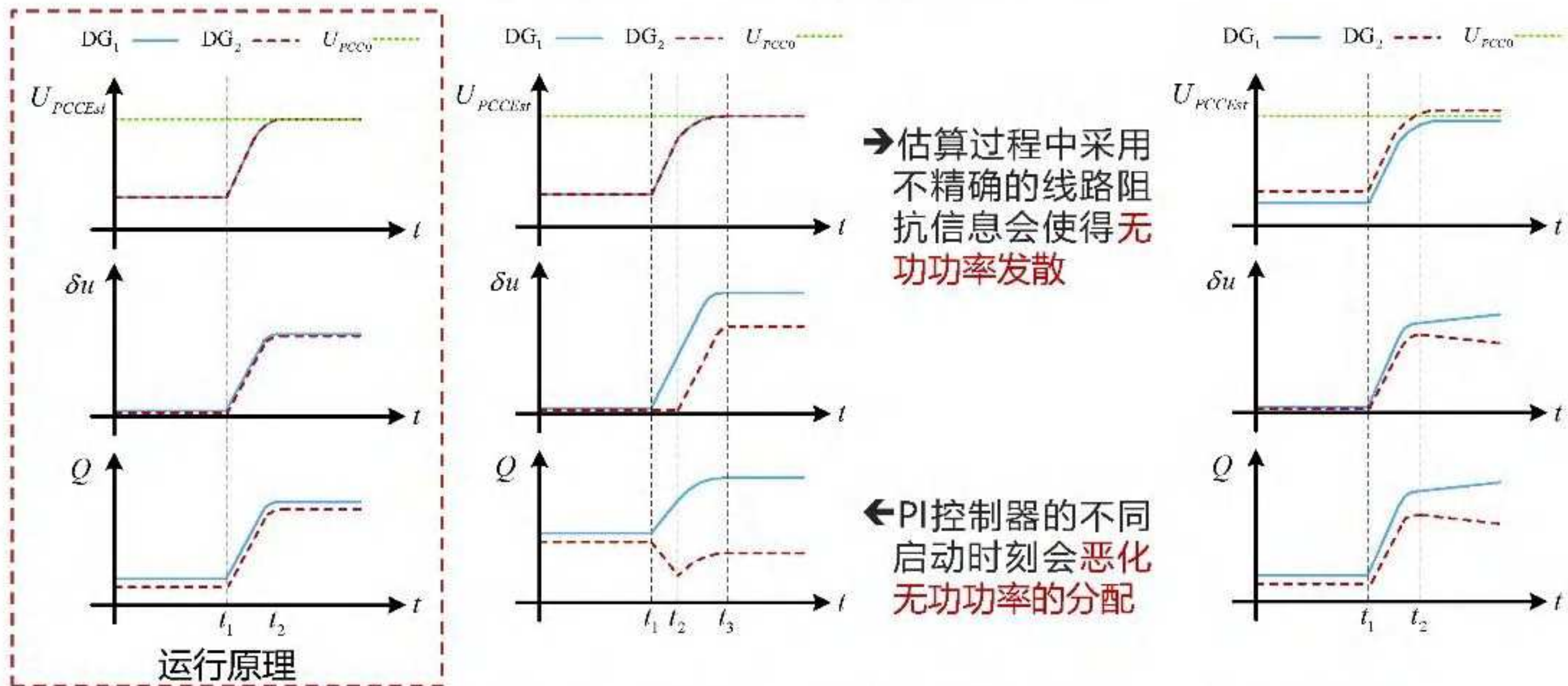
☺ 不依赖于通讯线





频率电压控制

传统基于PI控制器的电压二次控制的局限性



解决上述两个问题的关键在于要**均分**PCC点的估算电压 U_{PCCEst} 和电压补偿量 δu



频率电压控制：基于交流小信号同步的电压二次控制

基本原理

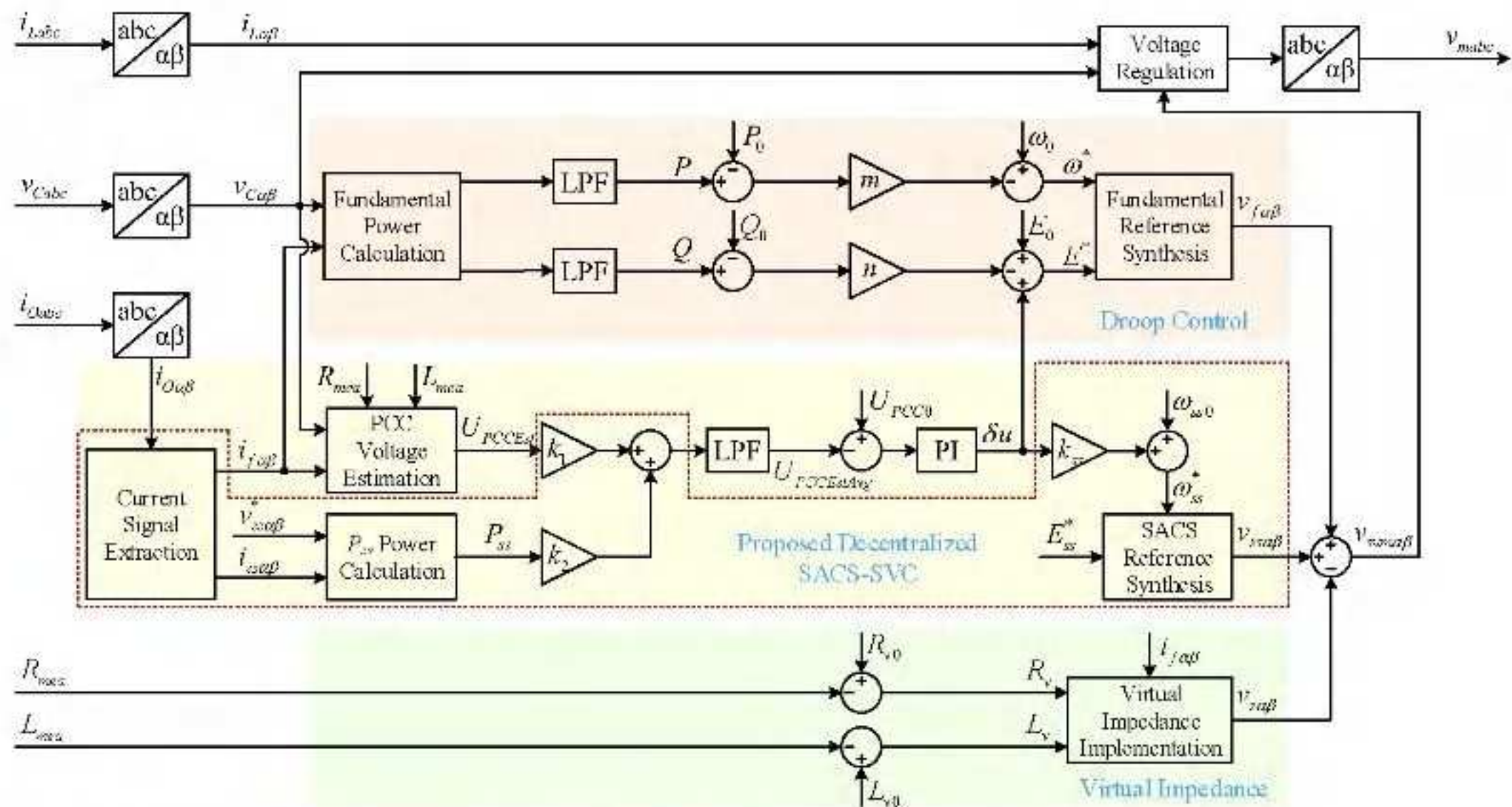
关键变量之间的作用关系

$$E^* = E_0 - n(Q - Q_0) + \delta u$$

$$\delta u = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \left(U_{PCC0} - \frac{\omega_c}{s + \omega_c} U_{PCCEstAvg}\right)$$

$$U_{PCCEstAvg} = k_1 U_{PCCEst} + k_2 P_{ss}$$

$$\omega_{ss}^* = \omega_{ss0} + k_{ss} \delta u$$



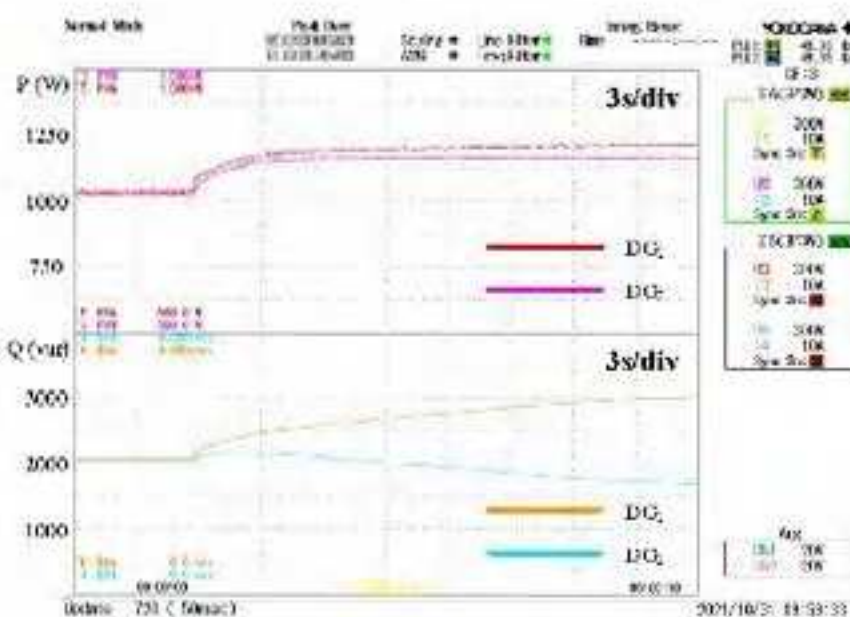
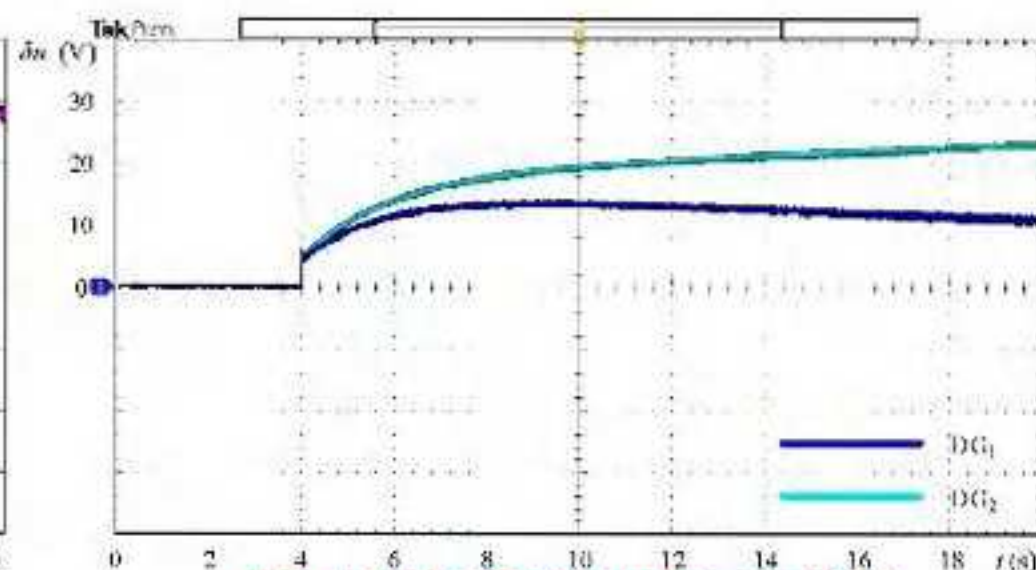
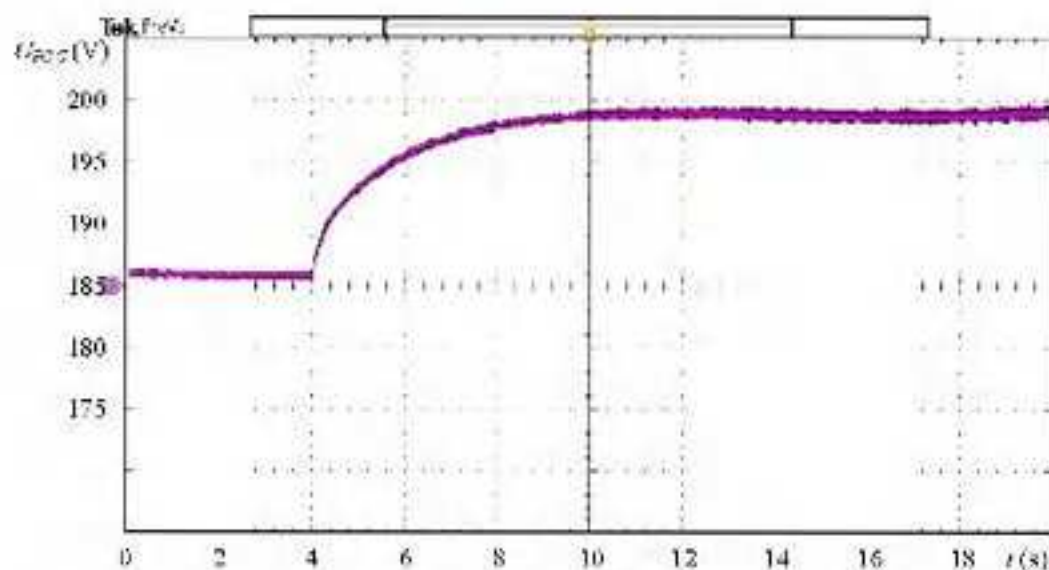
- 小信号频率 ω_{ss} 稳态同步一致，确保电压补偿量 δu 和电压估算值的平均值 $U_{PCCEstAvg}$ 均分



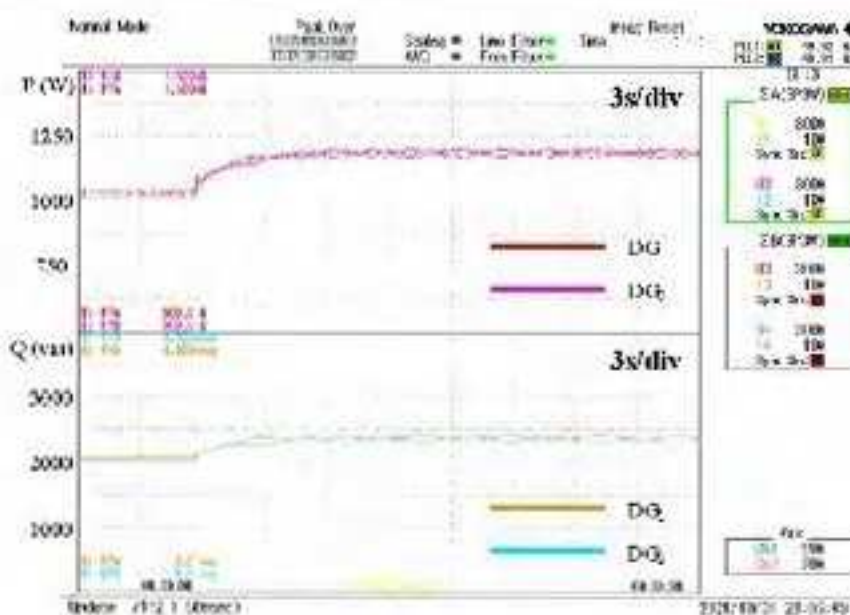
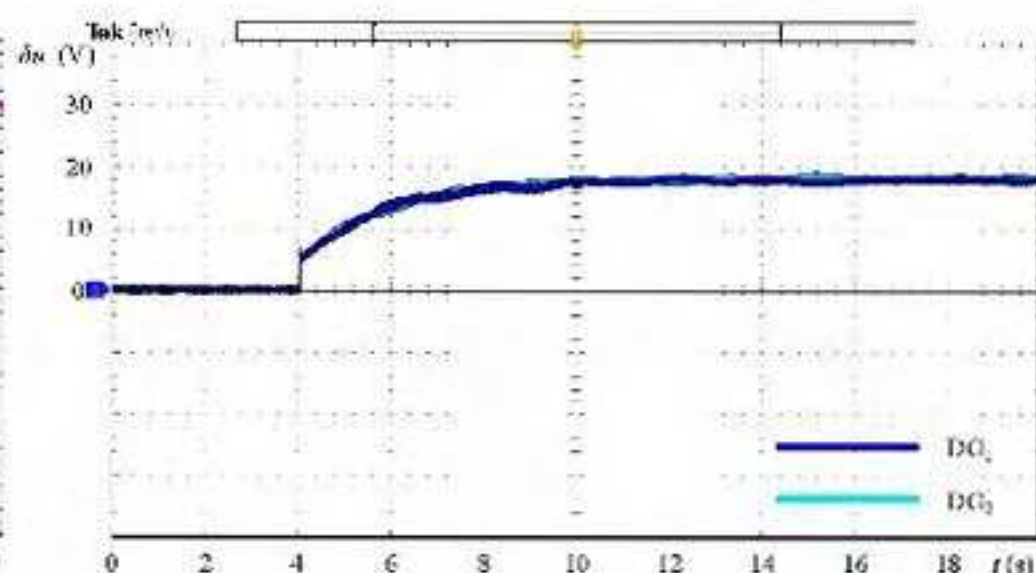
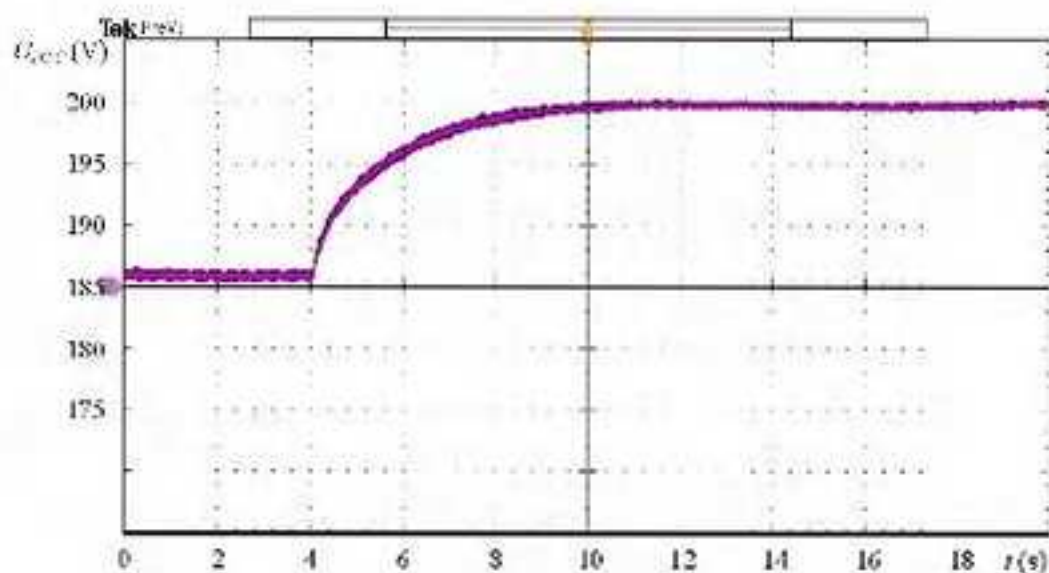
频率电压控制：基于交流小信号同步的电压二次控制



实验结果



基于PI控制器的电压二次控制

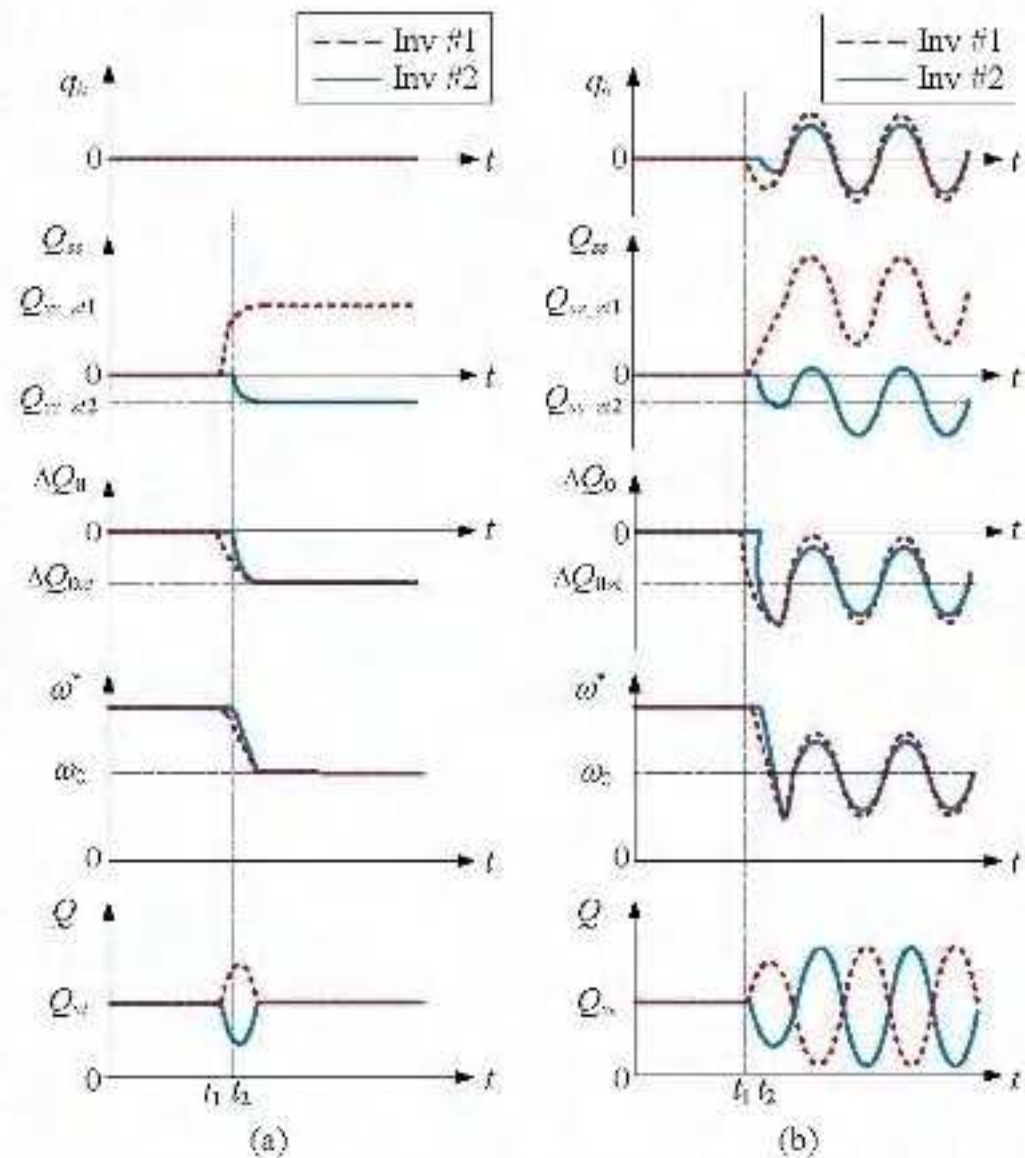
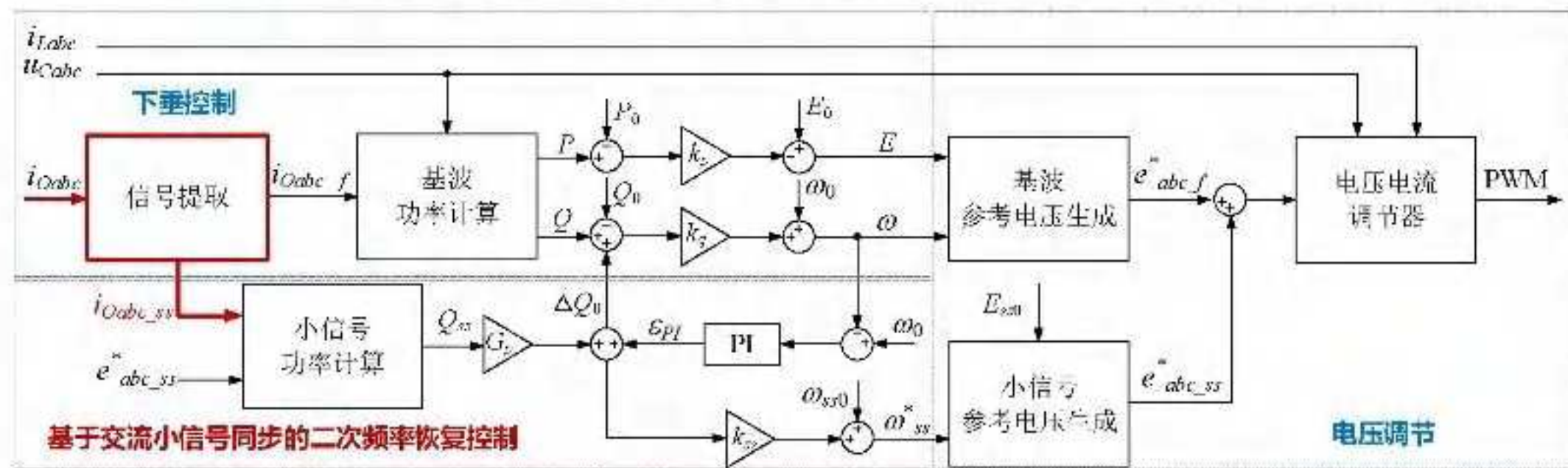


基于小信号同步的电压二次控制



频率电压控制：交流小信号高频化

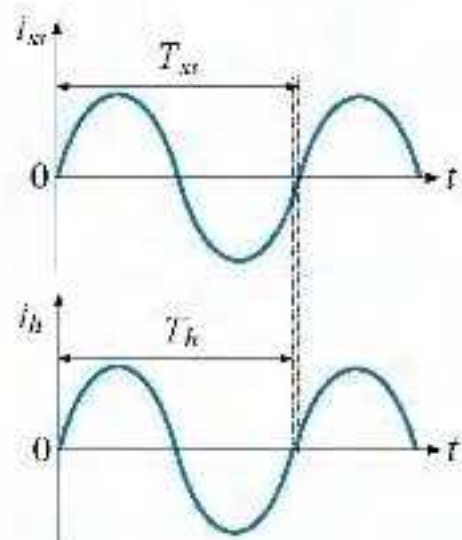
基于交流小信号同步的频率二次控制所面临挑战



(a)不存在相近频率谐波电流, (b)存在相近频率谐波电流

系统中低频谐波源:

- 非线性负载
- 中点电位波动
- 死区时间
-



小信号频率 ω_{ss0} 受开关频率限制:

- 电压环带宽
- 数字采样频率

开关频率10kHz:

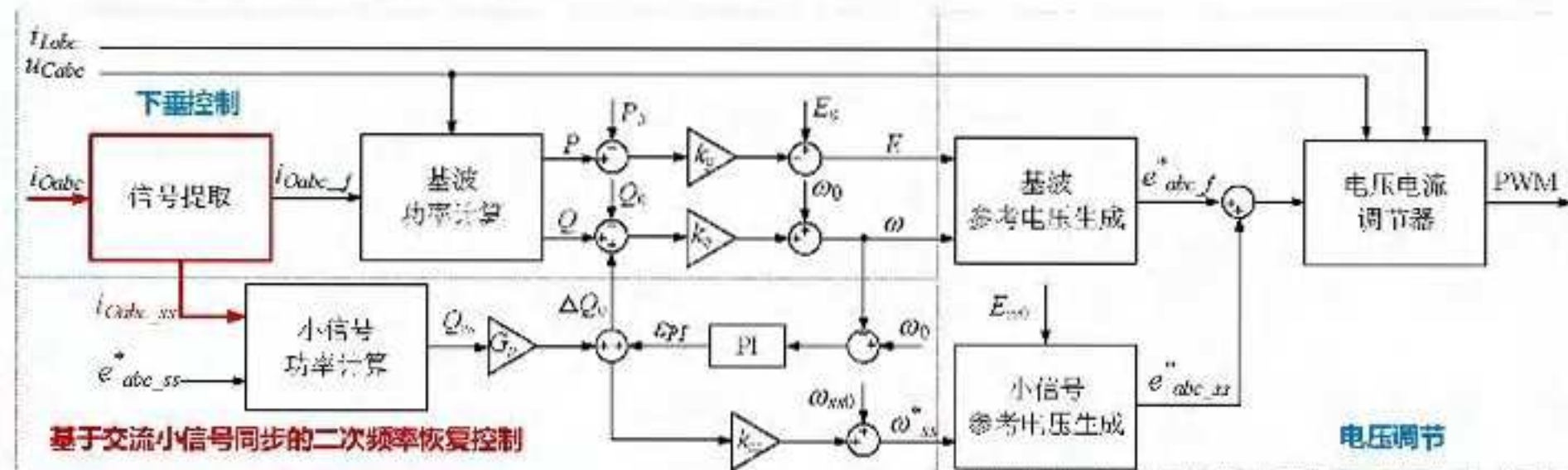
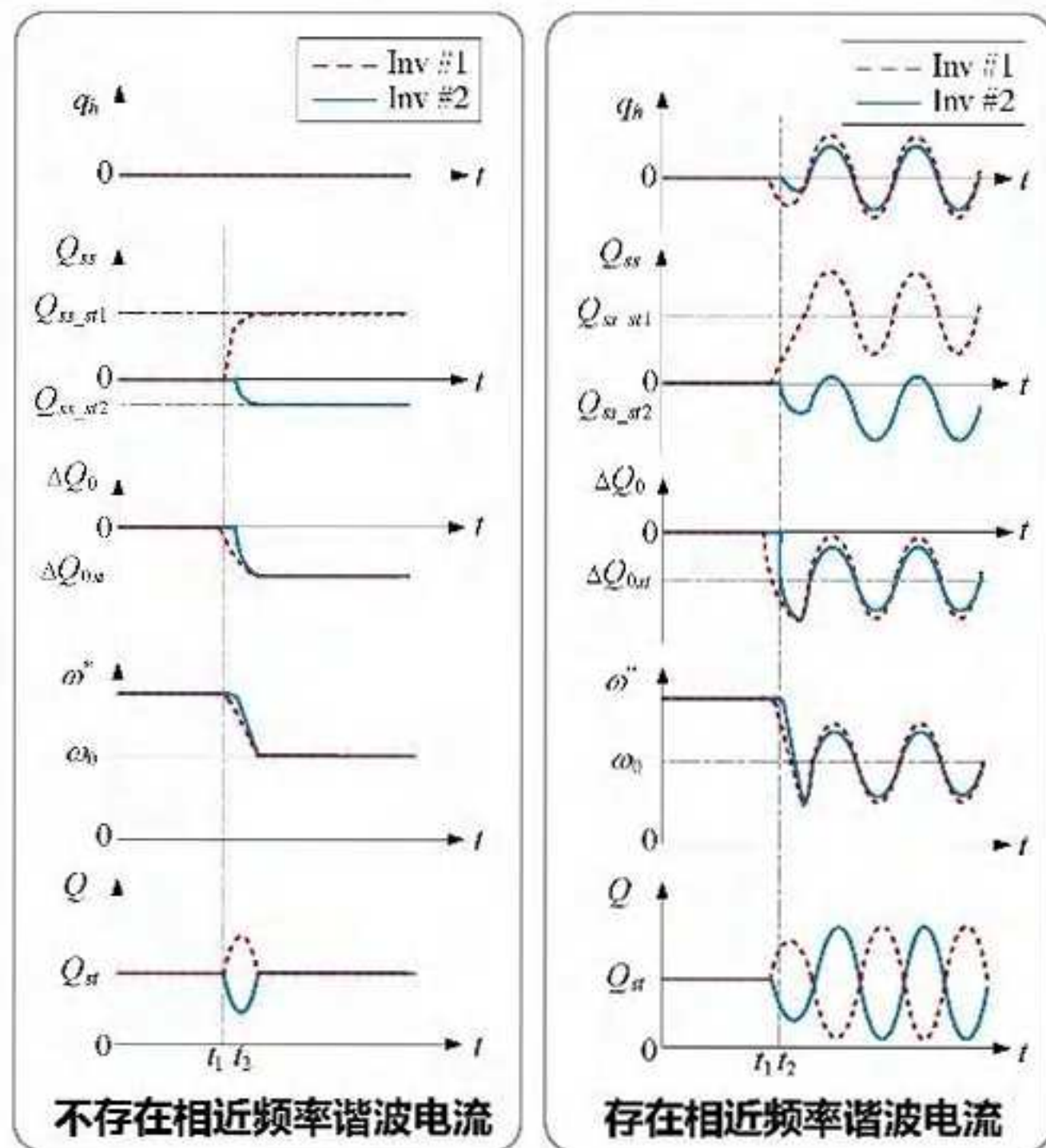
- 电压环带宽 $<1\text{kHz}$
- 可靠采样带宽 $<1\text{kHz}$

- 当系统中存在与交流小信号频率相近的谐波时, 谐波电流无法被滤除, 造成逆变器频率和功率振荡
- 交流小信号频率受开关频率限制, 无法进一步提高以远离主要的谐波频率



频率电压控制：交流小信号高频化

基于交流小信号同步的频率二次控制所面临挑战



系统中低频谐波源：

- 非线性负载
- 中点电位波动
- 死区时间
-

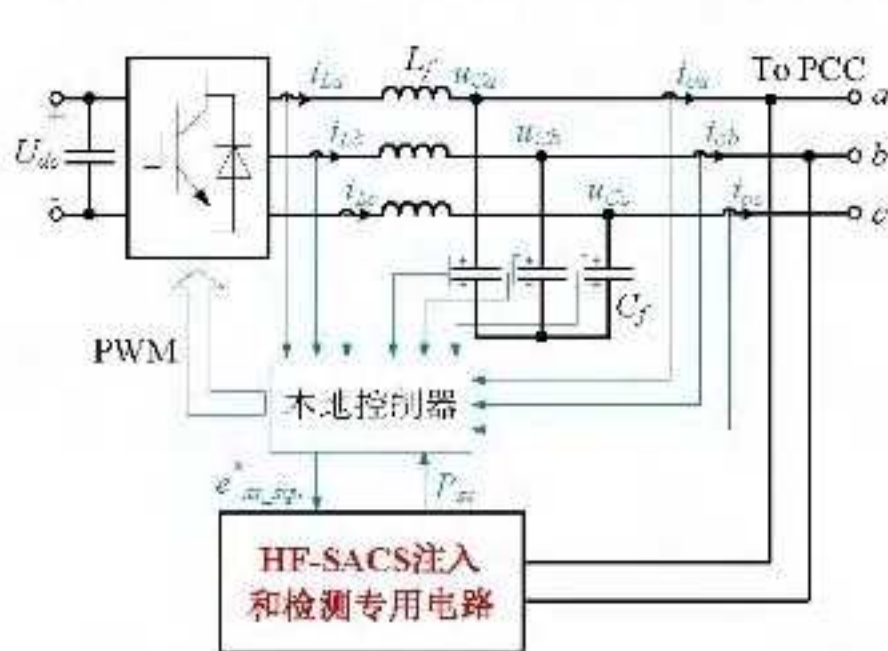
小信号频率 ω_{ss0} 受开关频率限制：

- 电压环带宽
- 数字采样频率

- 当系统中存在与交流小信号频率相近的谐波时，谐波电流无法被滤除，造成逆变器频率和功率振荡
- 交流小信号频率受开关频率限制，无法进一步提高以远离主要的谐波频率

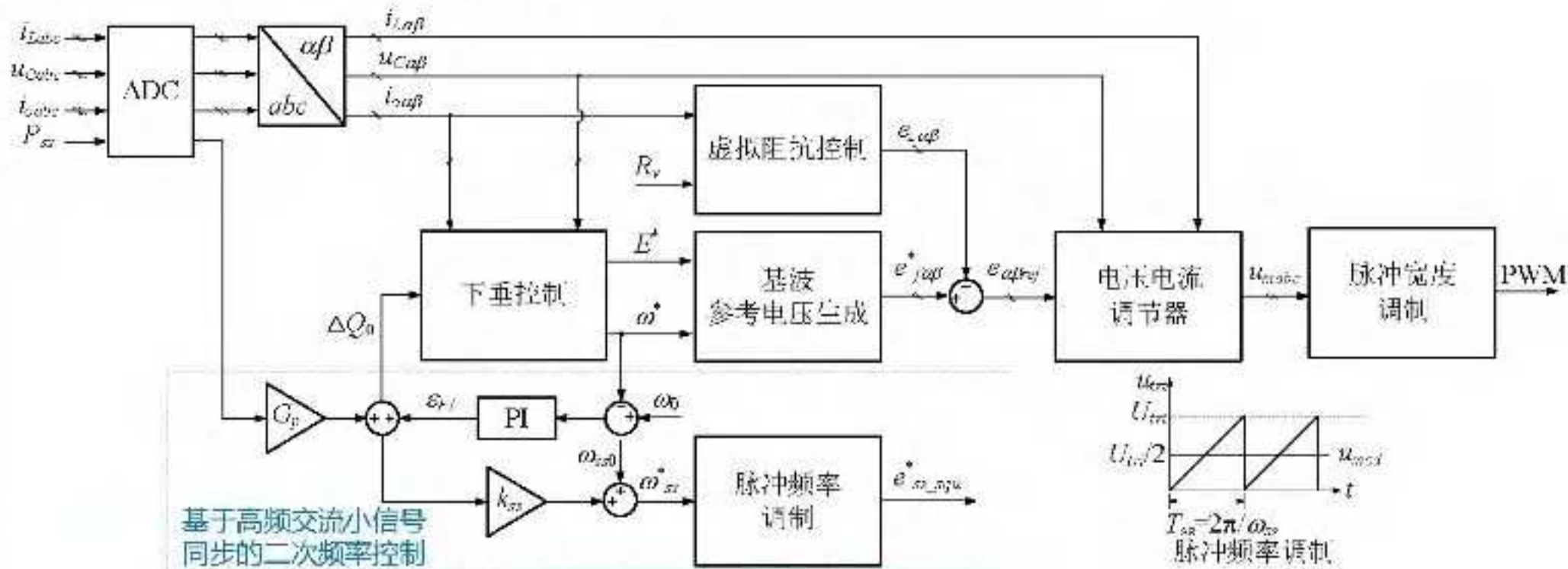
频率电压控制：交流小信号高频化

基于高频交流小信号同步的频率二次控制

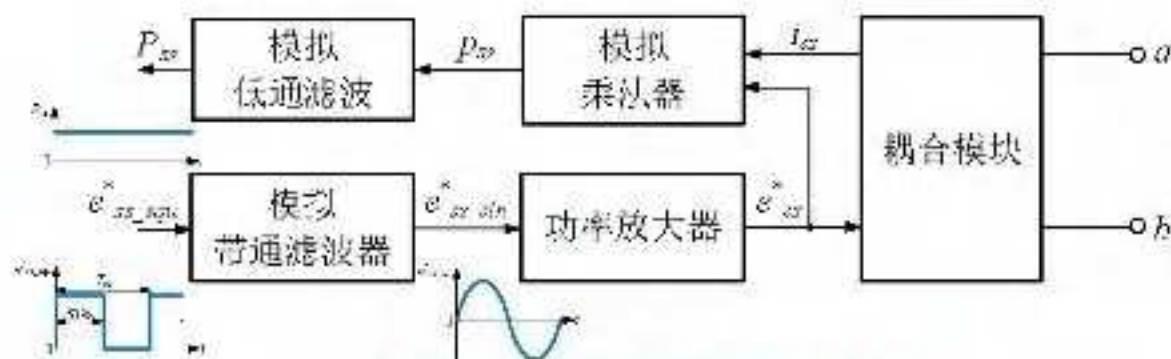


小信号频率 ω_{ss0} 不受开关频率限制:

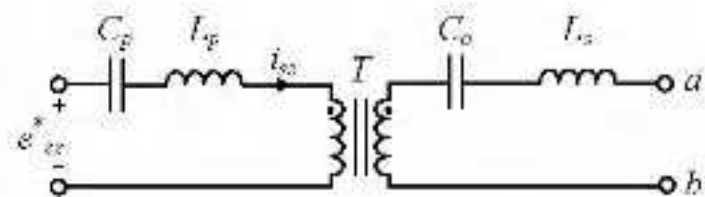
- 通过脉冲频率调制注入小信号频率方波 $e_{ss_squ}^*$
- 模拟电路计算小信号功率 P_{ss}



(a) 本地控制器



(b) 高频交流小信号注入和检测专用电路

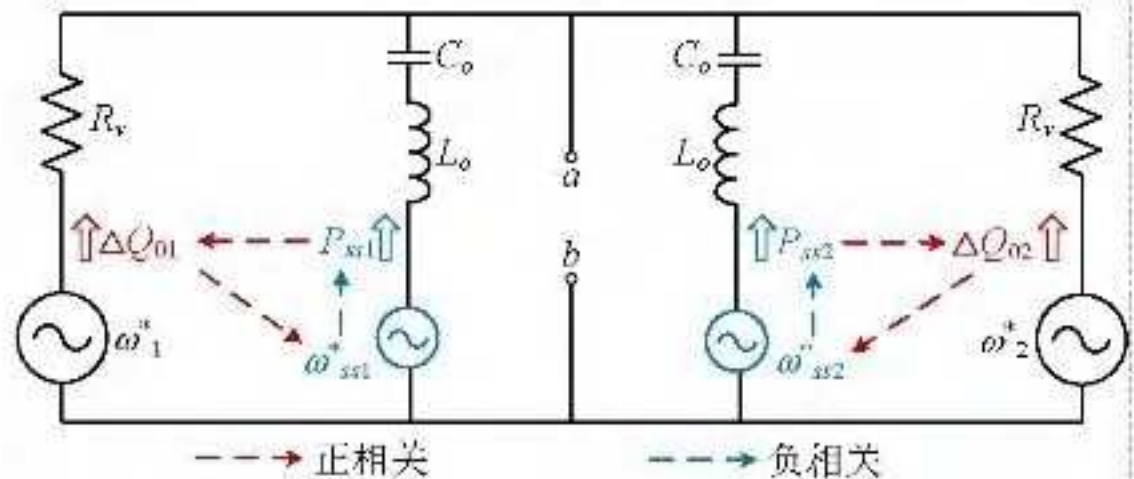


(c) 耦合模块

- 利用模拟专用电路对高频交流小信号进行注入和检测，避免了开关频率对小信号频率的限制
- 交流小信号可以选择较高的频率，以远离主要的谐波频率

频率电压控制：交流小信号高频化

基于高频交流小信号同步的频率二次控制



- P_{ss} 与 ω_{ss}^* 之间的电路关系

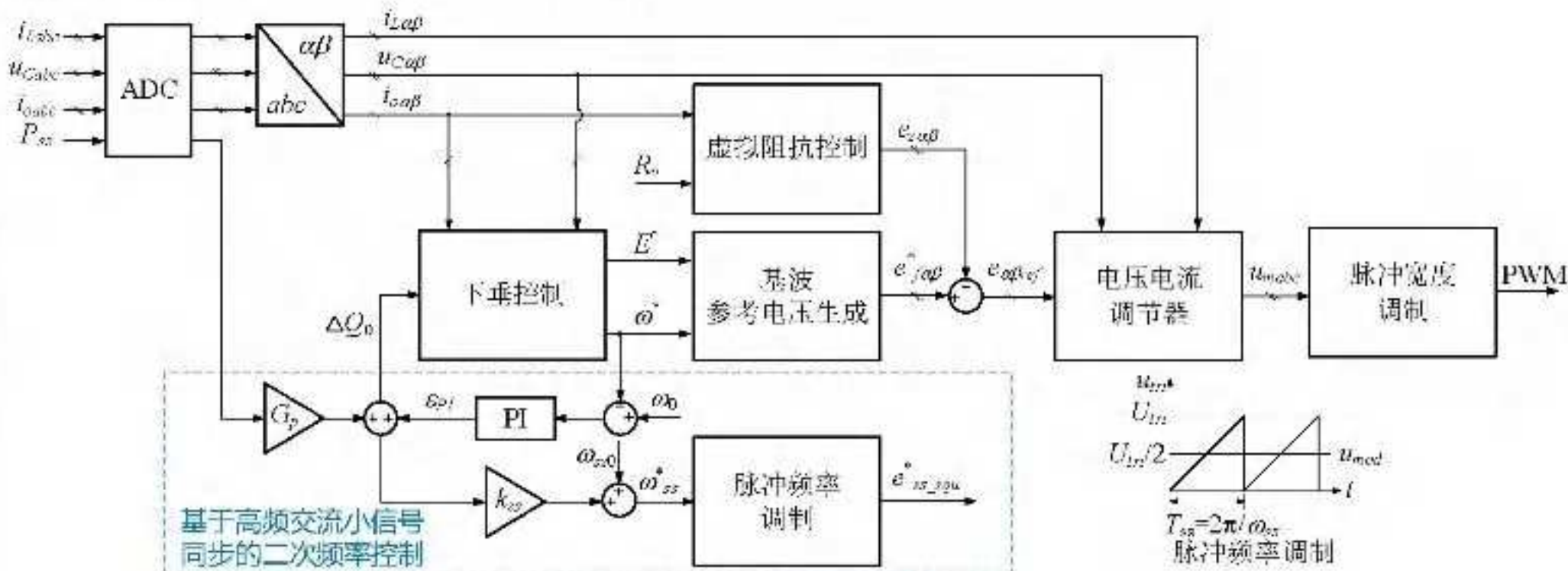
$$P_{ss} = \frac{E_{ss}^* U_{lssab}}{|Z_{LoCo}|} \sin \delta_{ss}, \delta_{ss} \in \left(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right)$$

- P_{ss} 与 ΔQ_0 之间的耦合关系

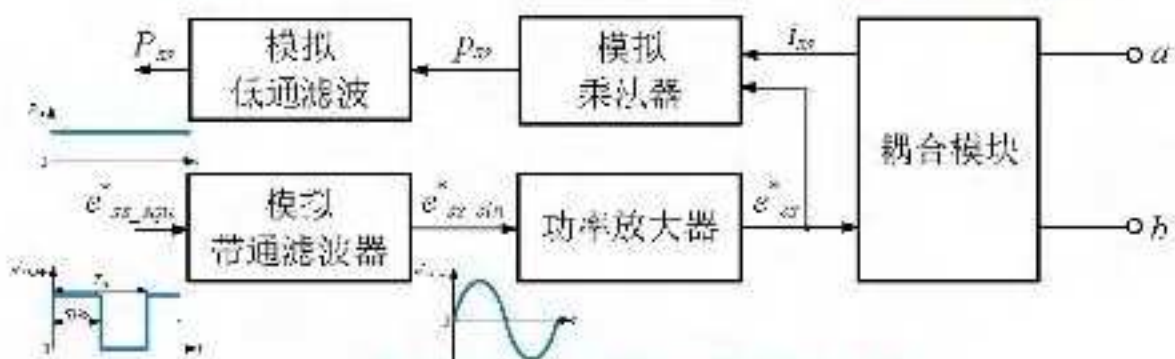
$$\Delta Q_0 = \varepsilon_{PI} + G_p P_{ss}$$

- ω_{ss}^* 与 ΔQ_0 之间的下垂关系

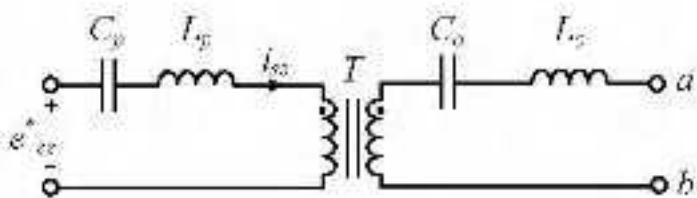
$$\omega_{ss}^* = \omega_{ss0} + k_{ss} \Delta Q_0$$



(a) 本地控制器



(b) 高频交流小信号注入和检测专用电路



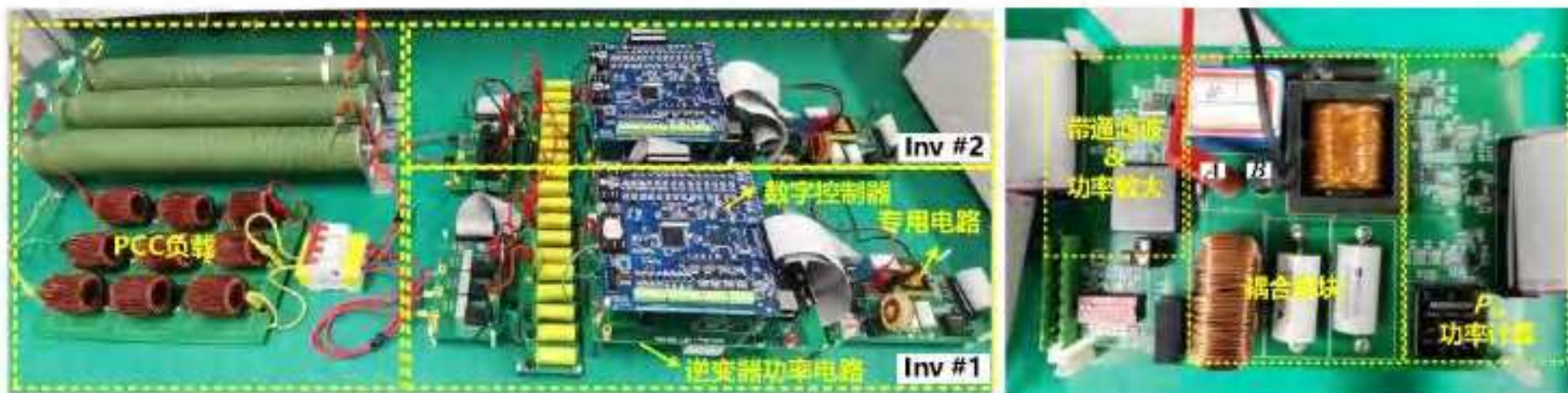
(c) 耦合模块

- 利用 ω_{ss}^* 与 P_{ss} 之间在电路上的负相关关系，并在控制中构建 ΔQ_0 与 P_{ss} 的正耦合关系， ΔQ_0 与 ω_{ss}^* 之间的正下垂关系，从而对 ΔQ_0 形成负反馈调节



频率电压控制：交流小信号高频化

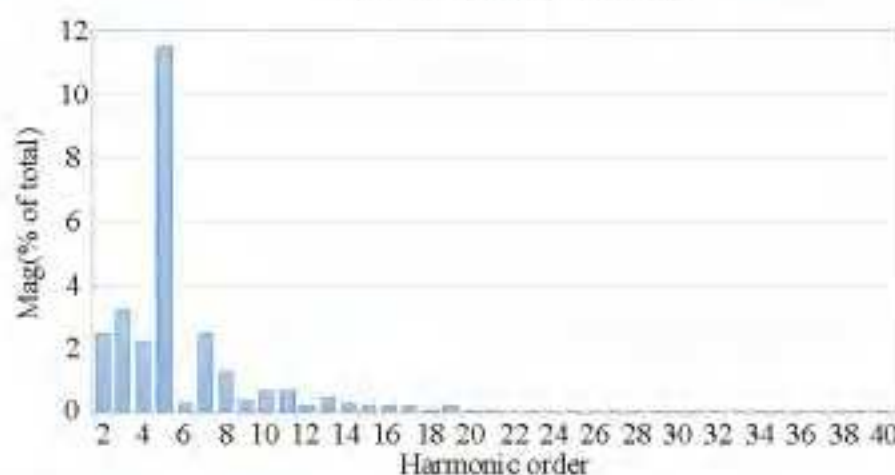
▪ 基于高频交流小信号同步的频率二次控制



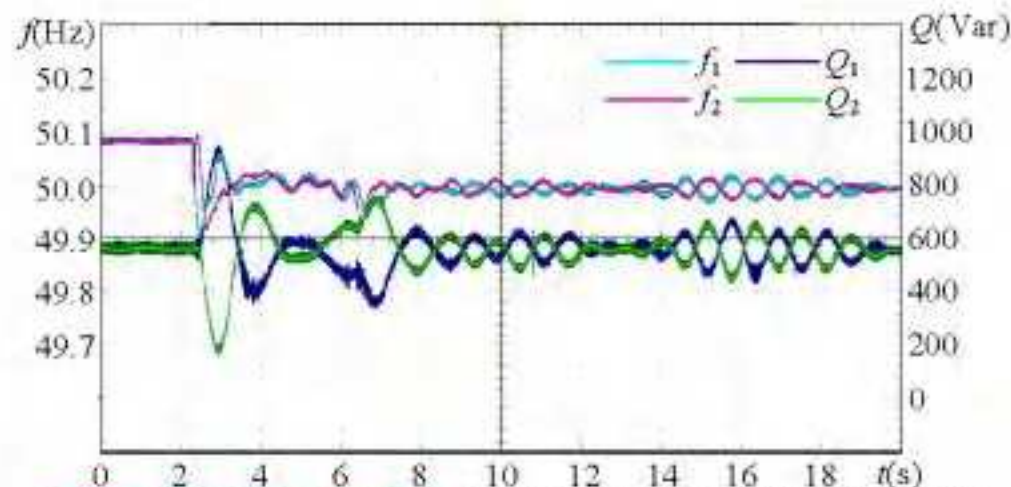
系统关键参数

符号	说明	数值
U_{dc}	输入直流电压(V)	250
E_0	额定输出相电压幅值(V)	100
ω_0	基波频率(rad/s)	$2\pi \times 50$
f_s	开关频率(kHz)	10
BW	电压控制环带宽(Hz)	500
Z_{Load}	三相对称负载(mH+ Ω)	2.5A-30mH 7A-22mH
ω_{ss0}	小信号额定频率(rad/s)	LF: $2\pi \times 200$ HF: $2\pi \times 2000$

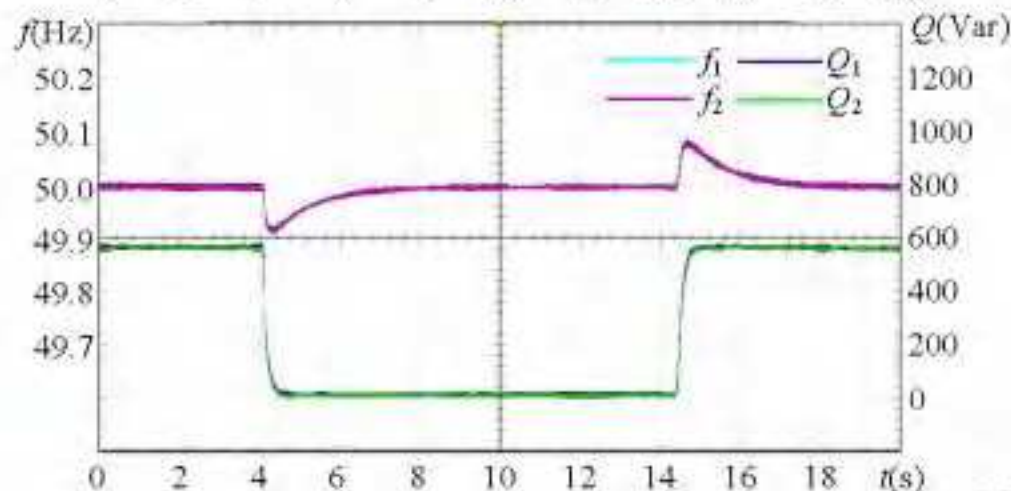
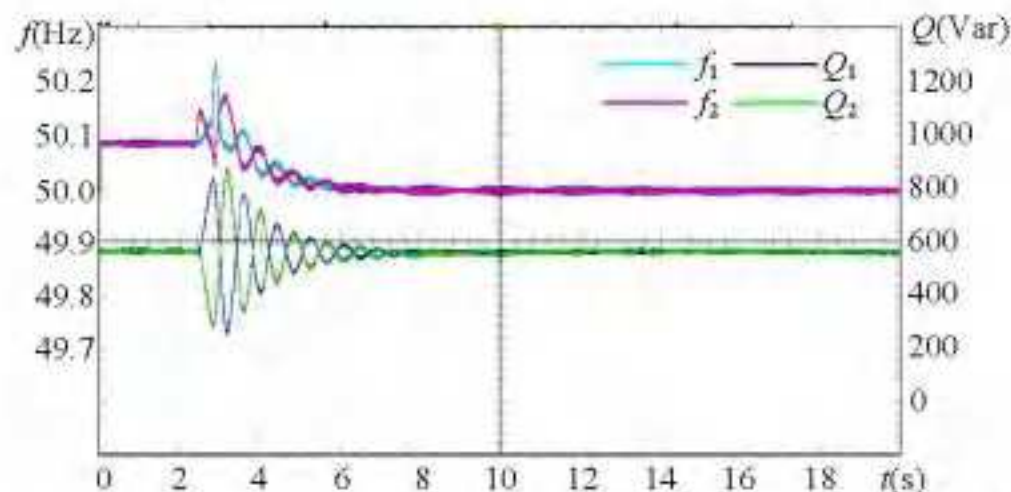
输出电流谐波分析



- 相比低频交流小信号方法，高频交流小信号避免了频率和功率振荡
- 高频交流小信号方法具有良好的动态性能



基于低频交流小信号同步的二次频率控制(200Hz)



基于高频交流小信号同步的二次频率控制(2kHz)



内容提要

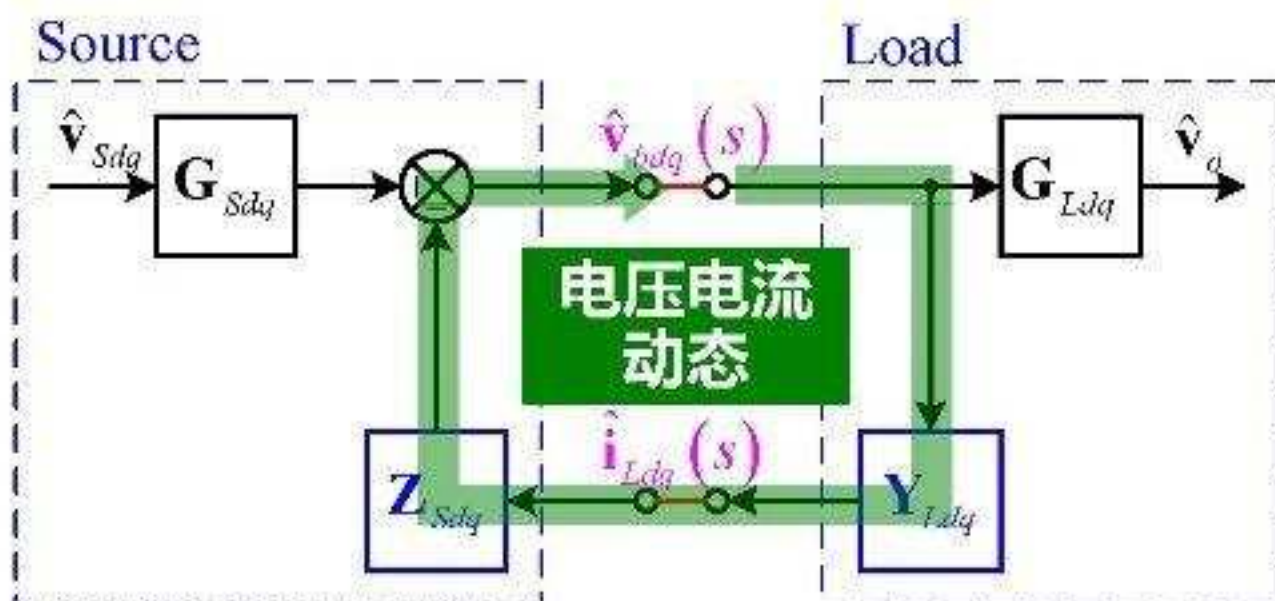


- 研究背景
- 系统架构
- 构网控制技术
- **系统振荡分析**
- 结论

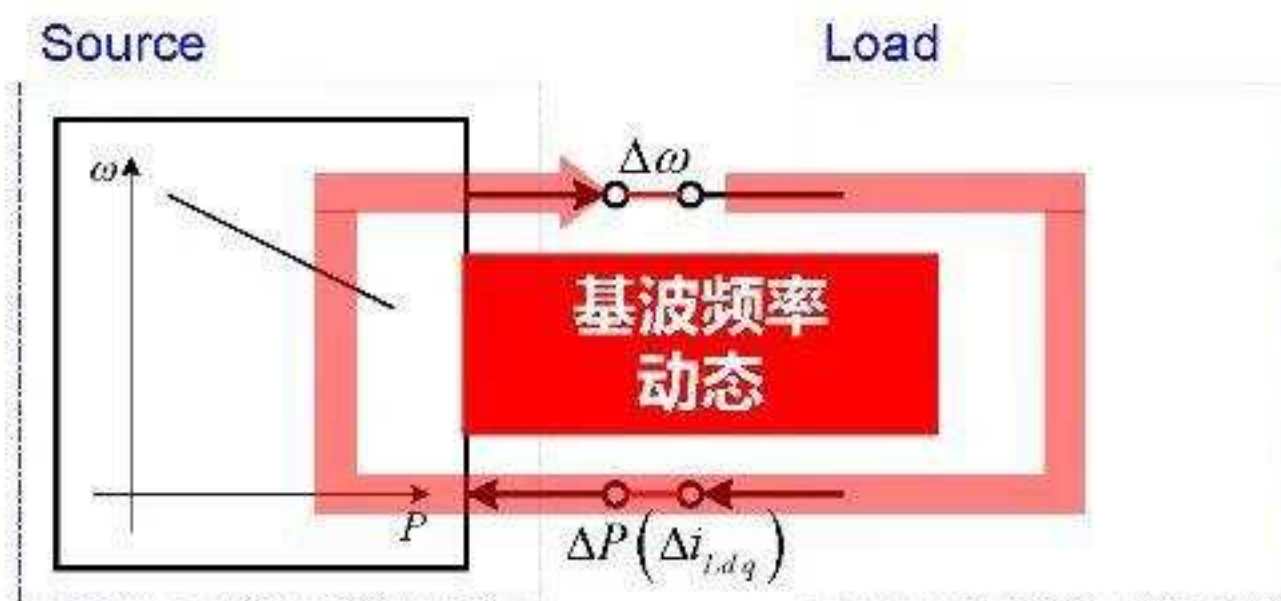
系统振荡分析

▪ 多变流器系统中变流器间动态耦合

主从架构



对等架构

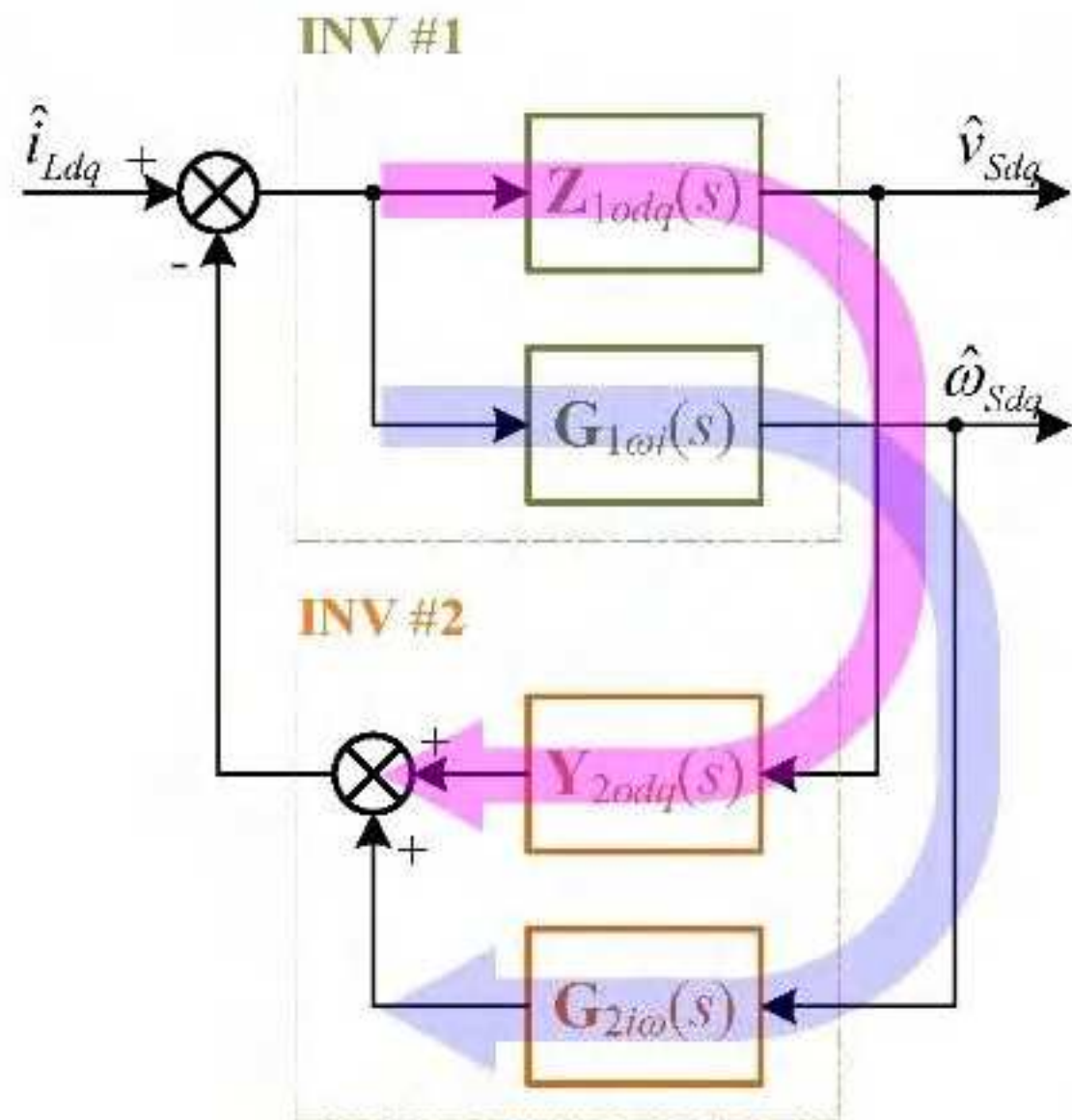
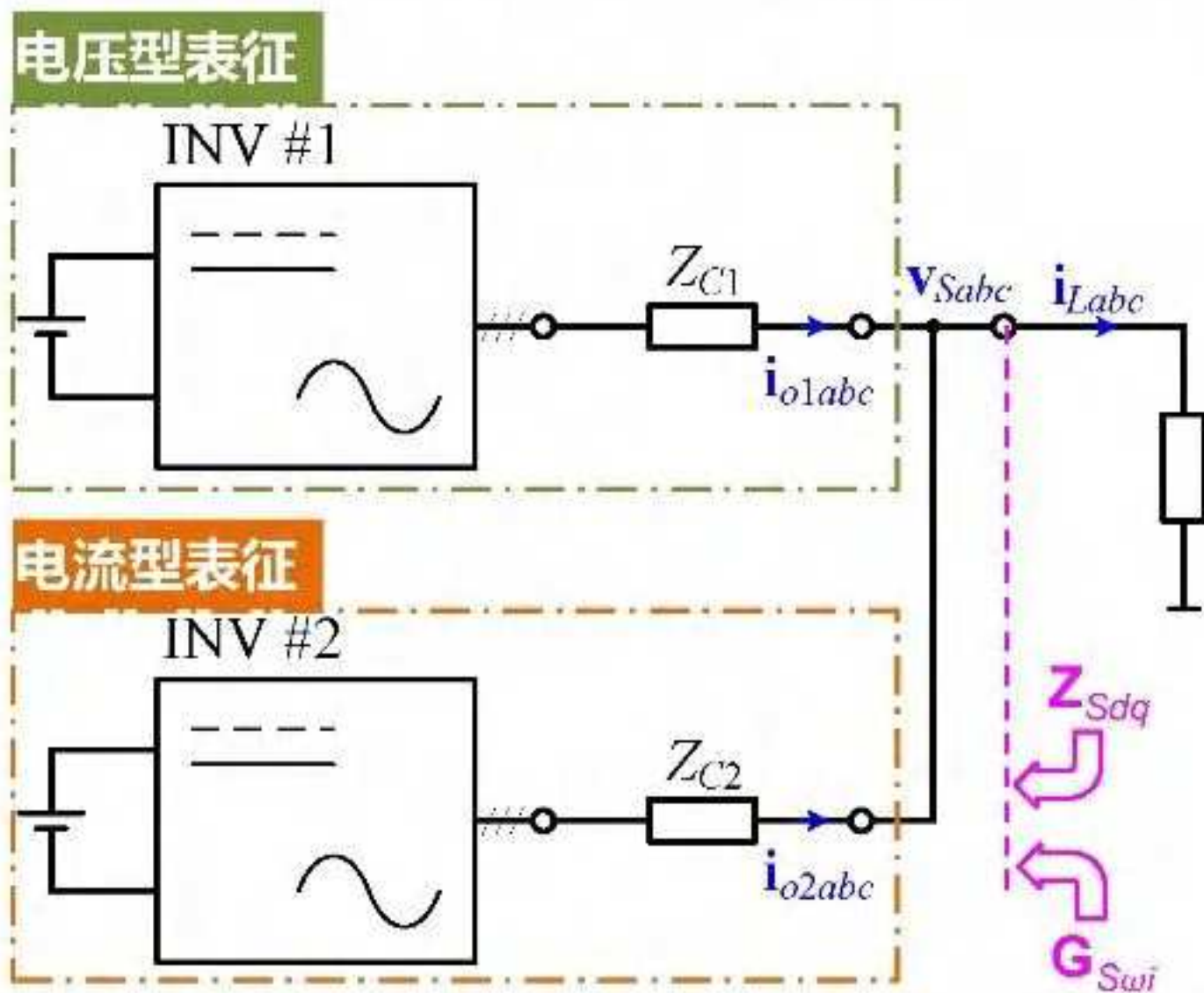


- 对等架构中电源与负载之间的**基波频率动态**无法通过电源输出阻抗和负载输入导纳进行描述
- 系统建模分析需包含基波动态行为



系统振荡分析

基于端口频率特性的系统建模方法



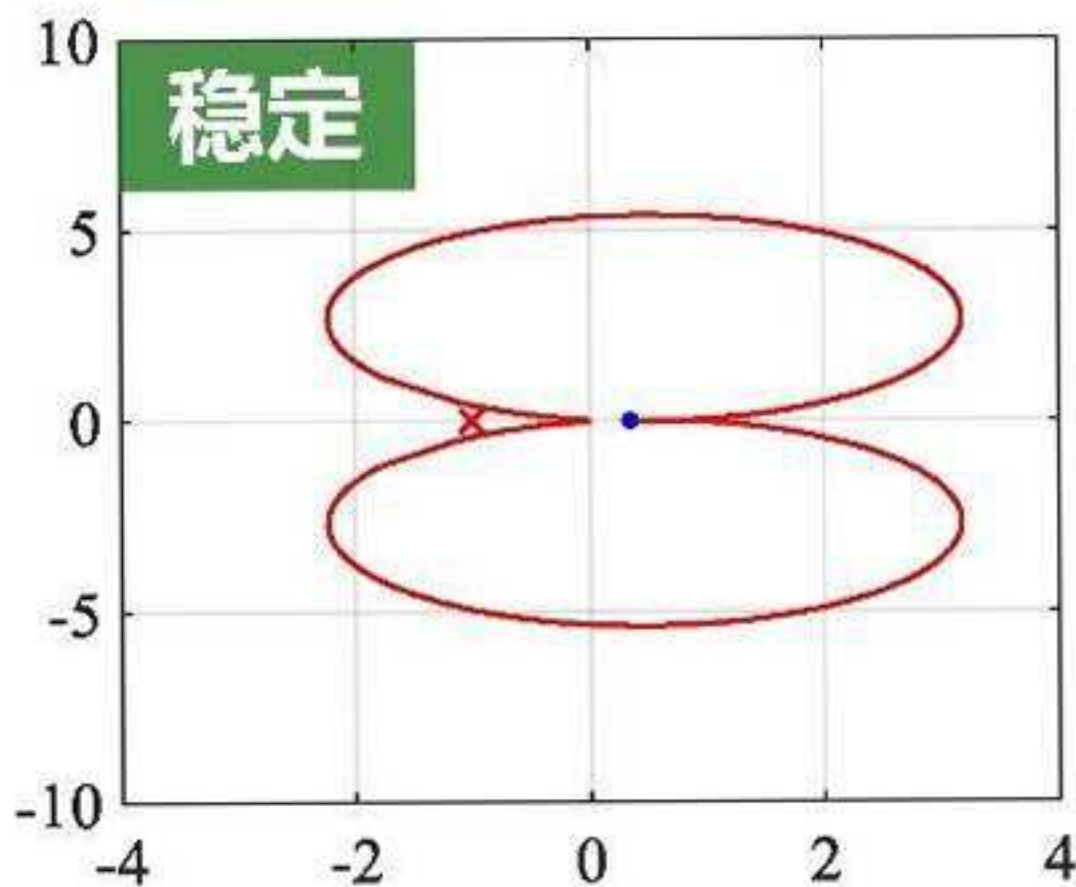
$$Z_{Sdq} = G_{1\omega i} \left[I + Y_{2odq} Z_{1odq} + G_{2i\omega} G_{1\omega i} \right]^{-1}$$

- 构网型变流器端口频率特性除阻抗（导纳）外，还有与**基波频率相关端口特性**
- 表征系统谐振的回率矩阵**不仅仅是阻抗与导纳的乘积**

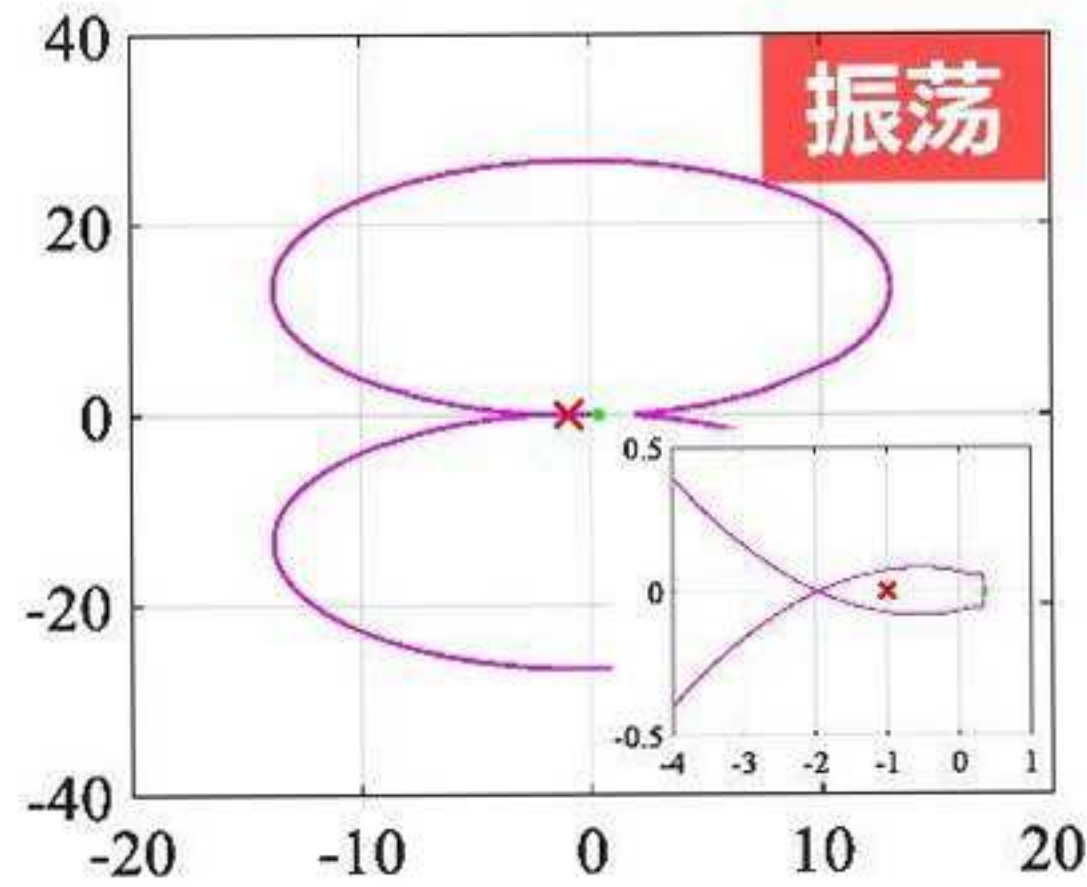


系统振荡分析

基于端口频率特性的系统建模方法



$$\lambda_{1,2} = \text{eign}(\mathbf{Y}_{2odq} \mathbf{Z}_{1odq}) \quad ?$$



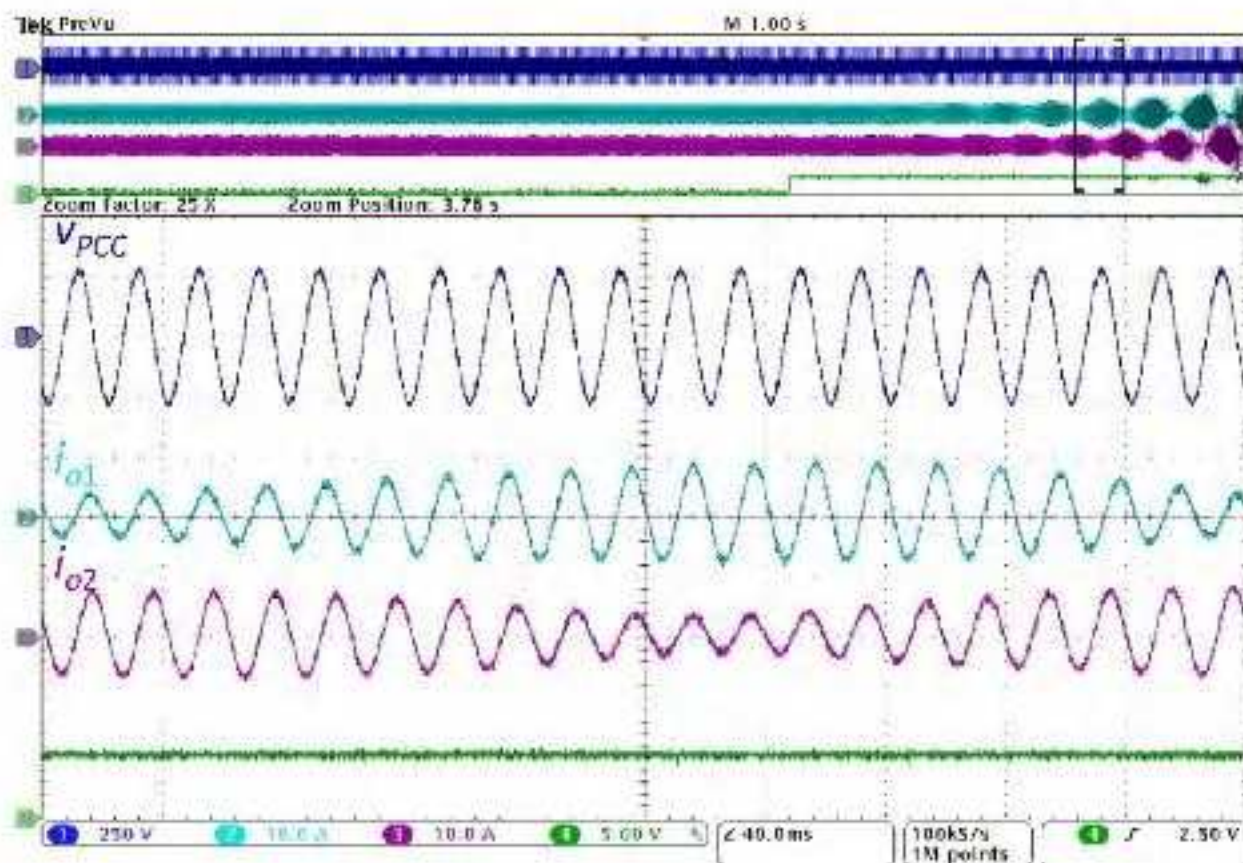
$$\lambda_{1,2} = \text{eign}(\mathbf{Y}_{2odq} \mathbf{Z}_{1odq} + \mathbf{G}_{2i\omega} \mathbf{G}_{1\omega i}) \quad \checkmark$$

- 构网型变流器端口频率特性除阻抗（导纳）外，还有与**基波频率相关端口特性**
- 表征系统谐振的回率矩阵**不仅仅是阻抗与导纳的乘积**



系统振荡分析

▪ 基于端口频率特性的系统建模方法



$$\lambda_{1,2} = \text{eign}(\mathbf{Y}_{2odq} \mathbf{Z}_{1odq}) \quad ?$$

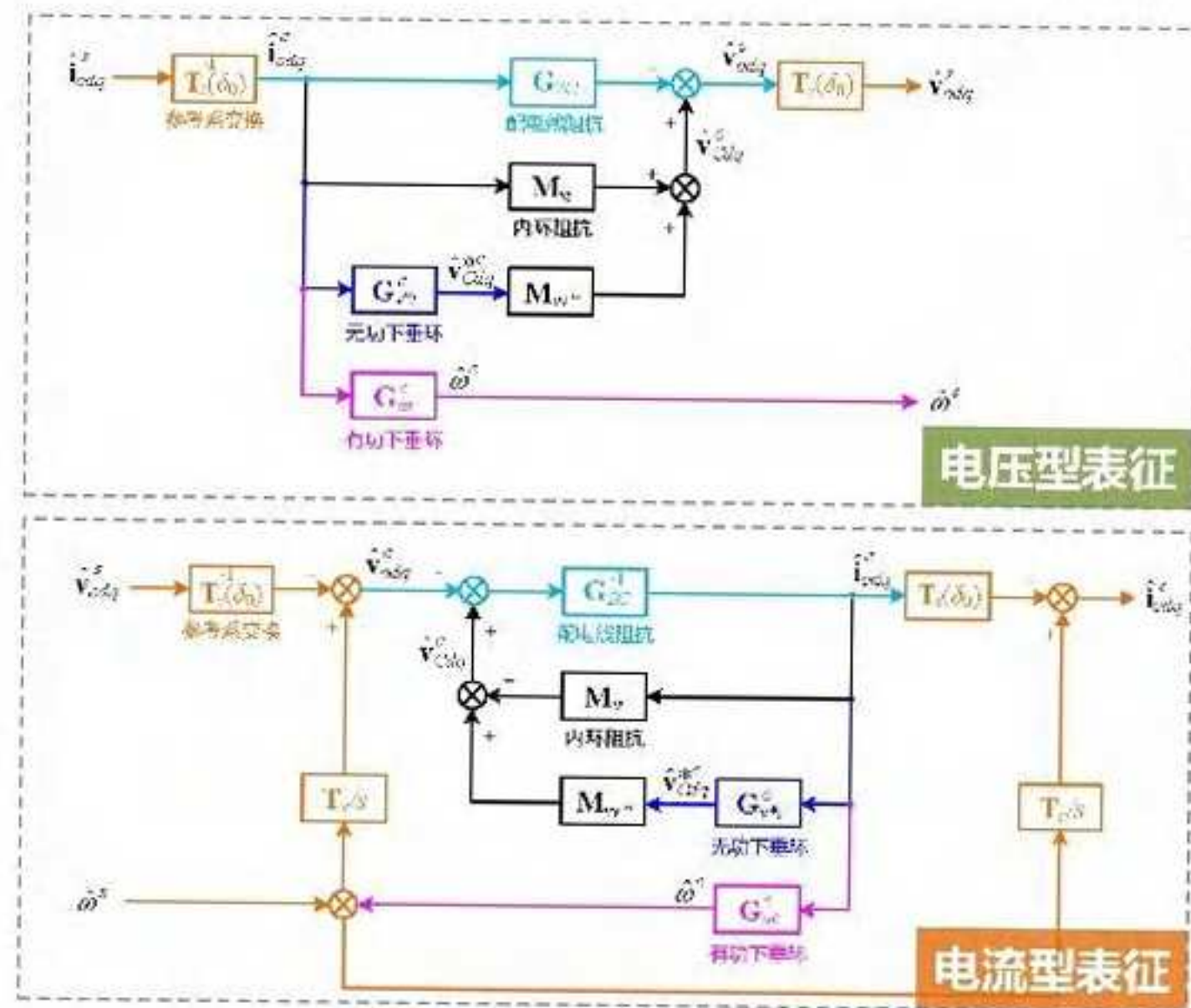
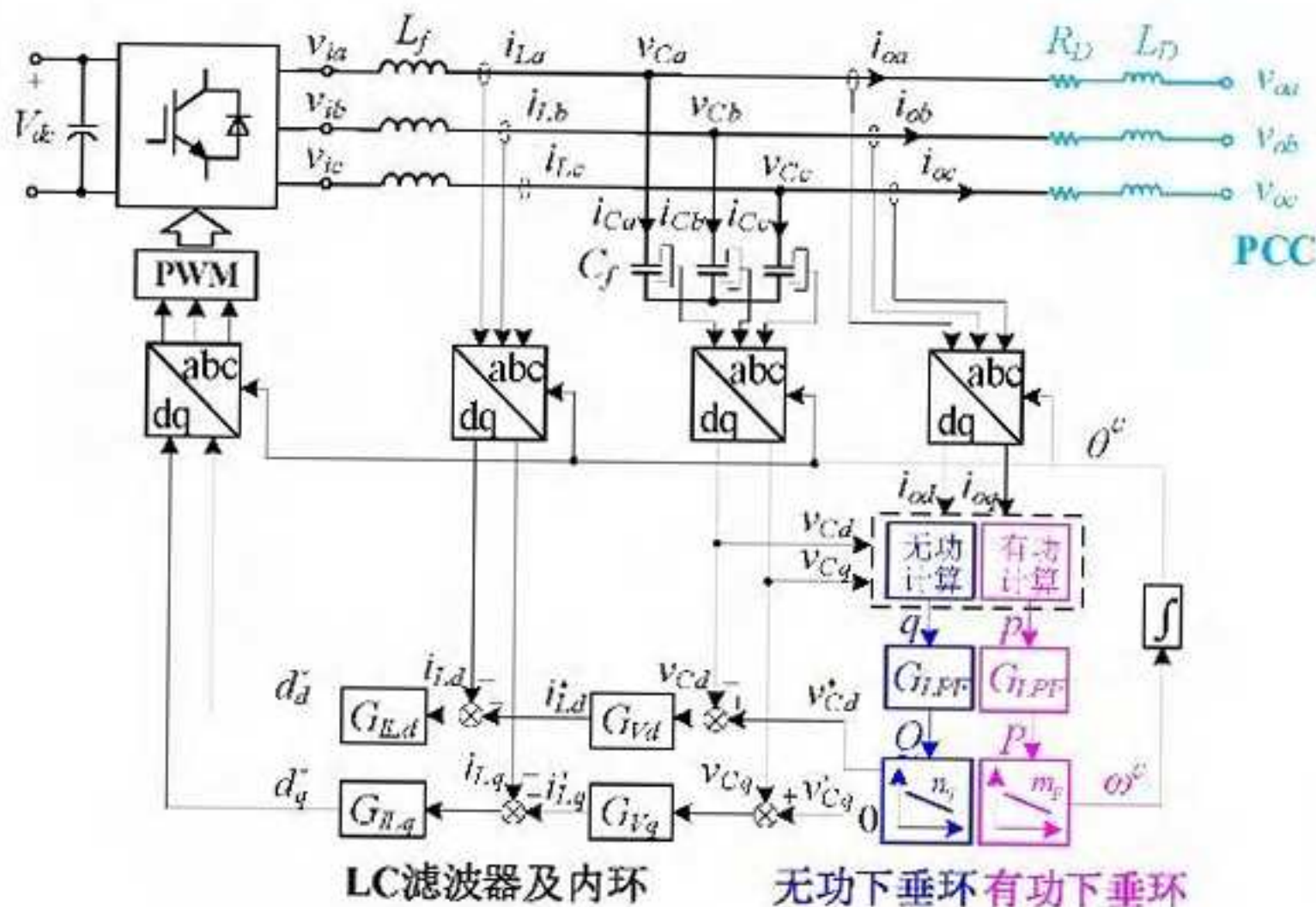
$$\lambda_{1,2} = \text{eign}(\mathbf{Y}_{2odq} \mathbf{Z}_{1odq} + \mathbf{G}_{2i\omega} \mathbf{G}_{1\omega i}) \quad \checkmark$$

- 构网型变流器端口频率特性除阻抗（导纳）外，还有与**基波频率相关端口特性**
- 表征系统谐振的回率矩阵**不仅仅是阻抗与导纳的乘积**



系统振荡分析

▪ 构网型变流器端口特性建模



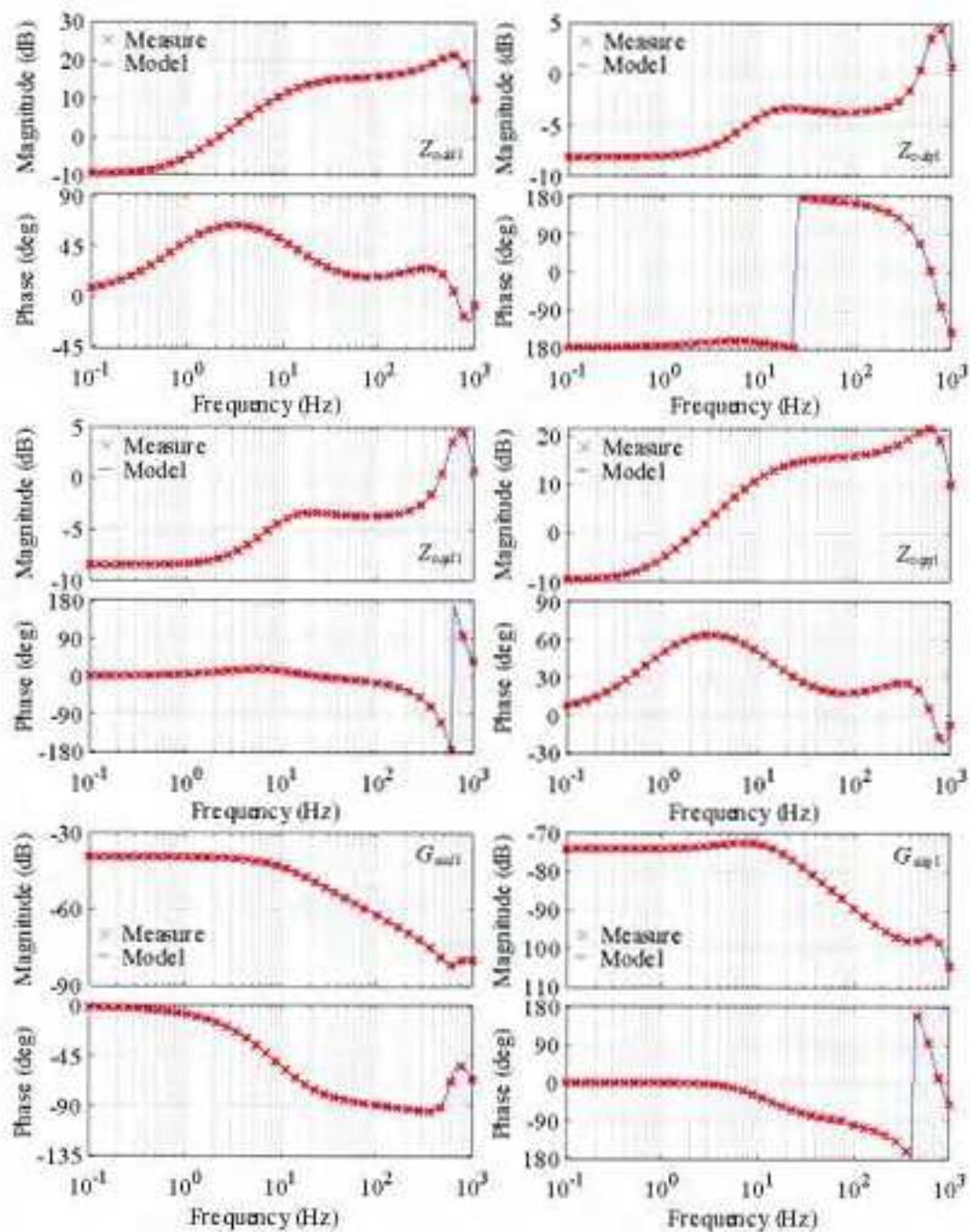
- 建立了包含**电压内环**、**功率下垂**、**配电线**、**坐标变换**4部分动态的模型，并考虑两种不同表征方式



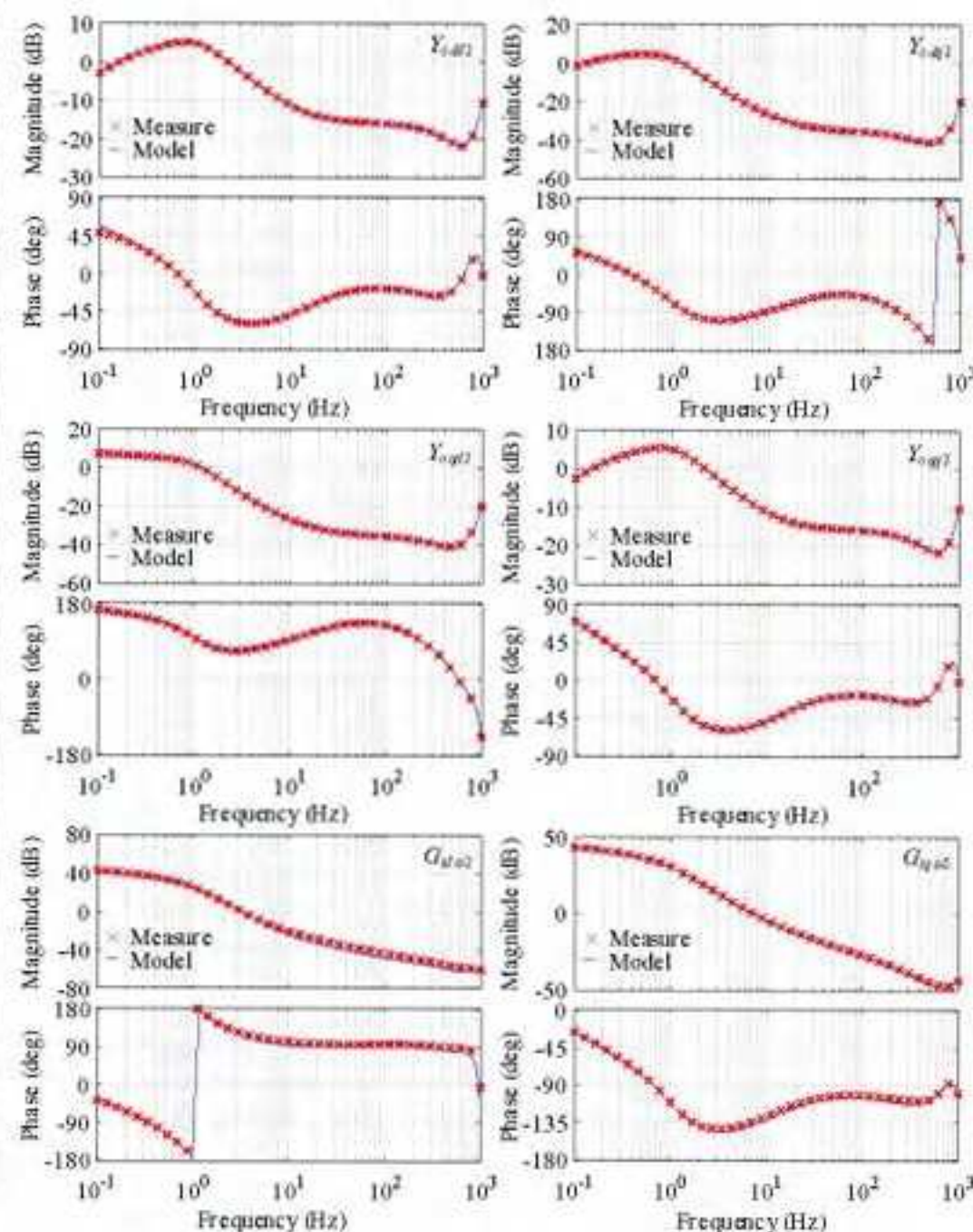
系统振荡分析

■ 构网型变流器端口特性建模

电压型表征



电流型表征

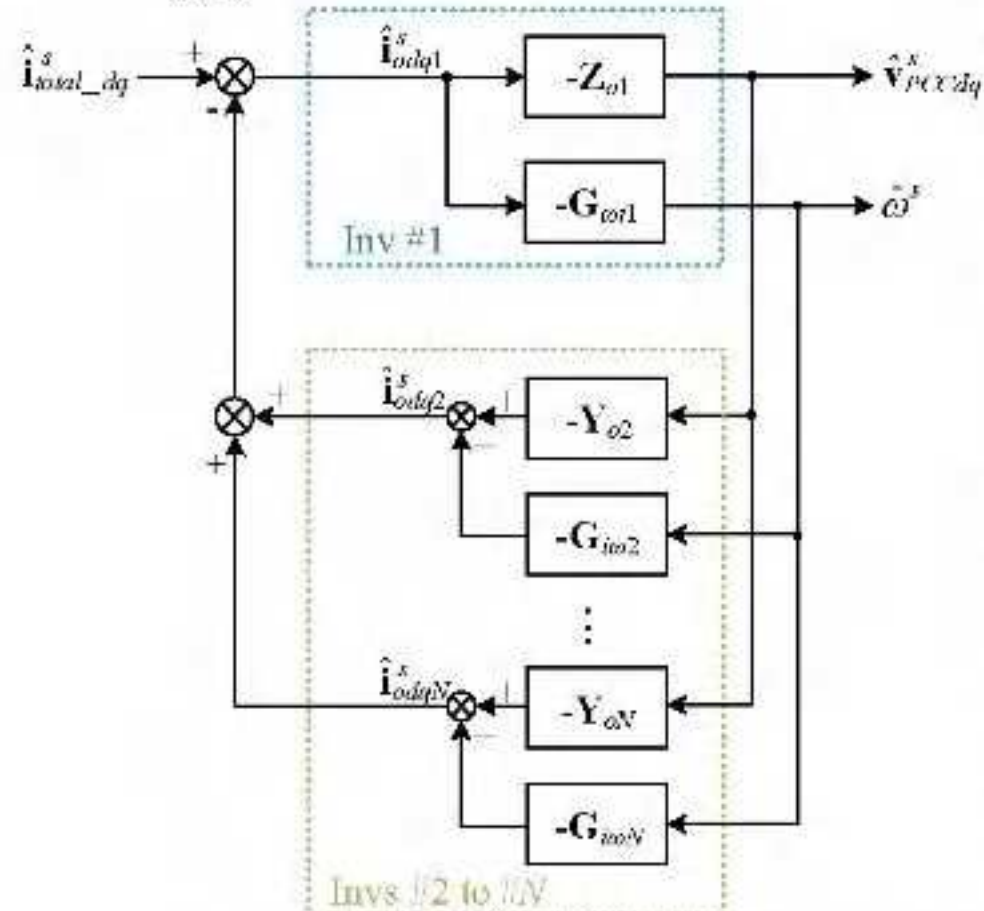


- 扫频结果与
模型计算结
果一致

多变流器系统模型特性分析

并联系统回率矩阵

$$\mathbf{L} = \sum_{k=1}^N (\mathbf{Y}_{ok} \cdot \mathbf{Z}_{o1} + \mathbf{G}_{io1k} \cdot \mathbf{G}_{oi1})$$



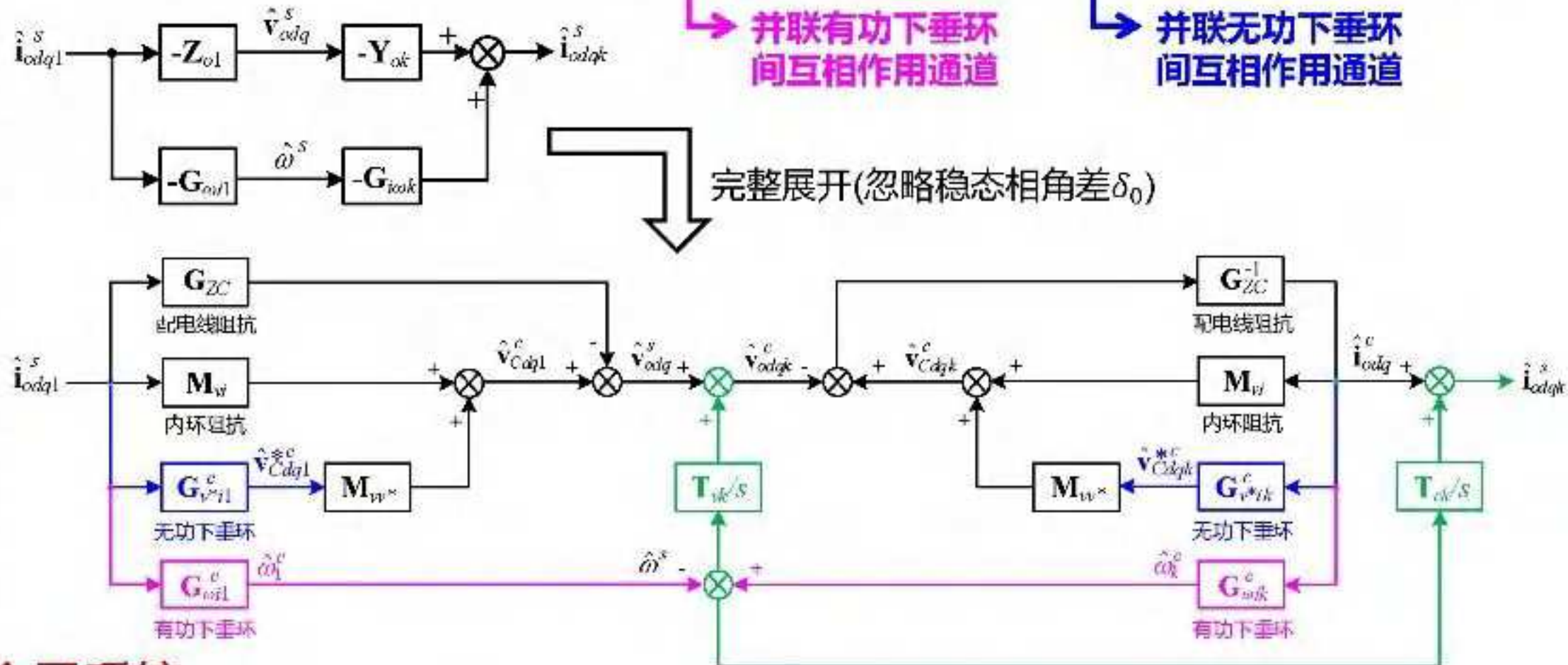
回率矩阵等效拆分

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{Y}_{ok} \cdot \mathbf{Z}_{o1} + \mathbf{G}_{io1k} \cdot \mathbf{G}_{oi1} = \mathbf{I} + \boxed{\mathbf{G}_{io1k} \cdot (\mathbf{G}_{oi1k}^c - \mathbf{G}_{oi1}^c)} + \boxed{\mathbf{Y}_{ok} \cdot \mathbf{M}_{vv*} \cdot (\mathbf{G}_{v*ik}^c - \mathbf{G}_{v*il}^c)}$$

并联有功下垂环
间互相作用通道

并联无功下垂环
间互相作用通道

完整展开(忽略稳态相角差 \$\delta_0\$)



- 回率矩阵可等效拆分为 \$k\$ 个子系统

- 并联系统下垂控制环路间的互相作用通道可从回率矩阵中分离



系统振荡分析

多变流器系统模型特性分析

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{Y}_{ok} \cdot \mathbf{Z}_{o1} + \mathbf{G}_{io{k}} \cdot \mathbf{G}_{oi1} = \mathbf{I} + \underbrace{\mathbf{G}_{io{k}} \cdot (\mathbf{G}_{oi{k}}^c - \mathbf{G}_{oi1}^c)}_{\text{并联有功下垂环路间互相作用通道}} + \underbrace{\mathbf{Y}_{ok} \cdot \mathbf{M}_{vi^*} \cdot (\mathbf{G}_{vi{k}}^c - \mathbf{G}_{vi1}^c)}_{\text{并联无功下垂环路间互相作用通道}}$$

端口导纳：电流表征下频率作用构造电流源特性，形成低导纳

内环阻抗：电压反馈环构造电压源特性，形成低阻抗

$$\mathbf{G}_{oi}^c \approx -\frac{3}{2} \underbrace{m_p G_{LPF}}_{\text{内环阻抗}} \cdot \left(V_{Cd}^c + I_{od}^c \cdot \mathbf{M}_{vidd}, I_{oq}^c \cdot \mathbf{M}_{viqq} \right)$$

$$\mathbf{G}_{vi^*}^c \approx -\frac{3}{2} \underbrace{n_q G_{LPF}}_{\text{内环阻抗}} \cdot \begin{bmatrix} -I_{oq}^c \cdot \mathbf{M}_{vidd} & -V_{Cd}^c + I_{od}^c \cdot \mathbf{M}_{viqq} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_{io{k}} \cdot (\mathbf{G}_{oi{k}}^c - \mathbf{G}_{oi1}^c) = \begin{bmatrix} A_{dk} \cdot B_{dk} & 0 \\ A_{qk} \cdot B_{dk} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_{ok} \cdot \mathbf{M}_{vi^*} \cdot (\mathbf{G}_{vi{k}}^c - \mathbf{G}_{vi1}^c) = \begin{bmatrix} 0 & C_{d{k}} \cdot D_{dqk} \\ 0 & C_{q{k}} \cdot D_{dqk} \end{bmatrix}$$

- 并联**有功下垂环路间及无功下垂环路间**互相作用分别主要影响回率矩阵的**d通道和q通道元素**
- 无功下垂控制环路对回率矩阵的影响**远弱于有功下垂控制环路**

回率矩阵简化

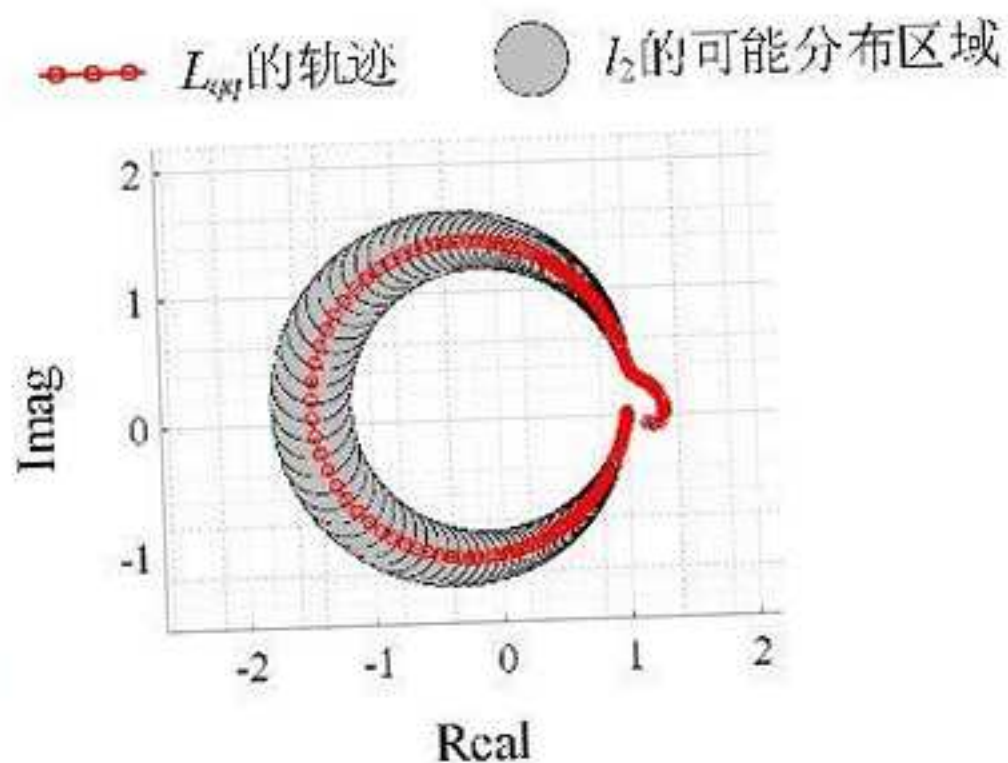
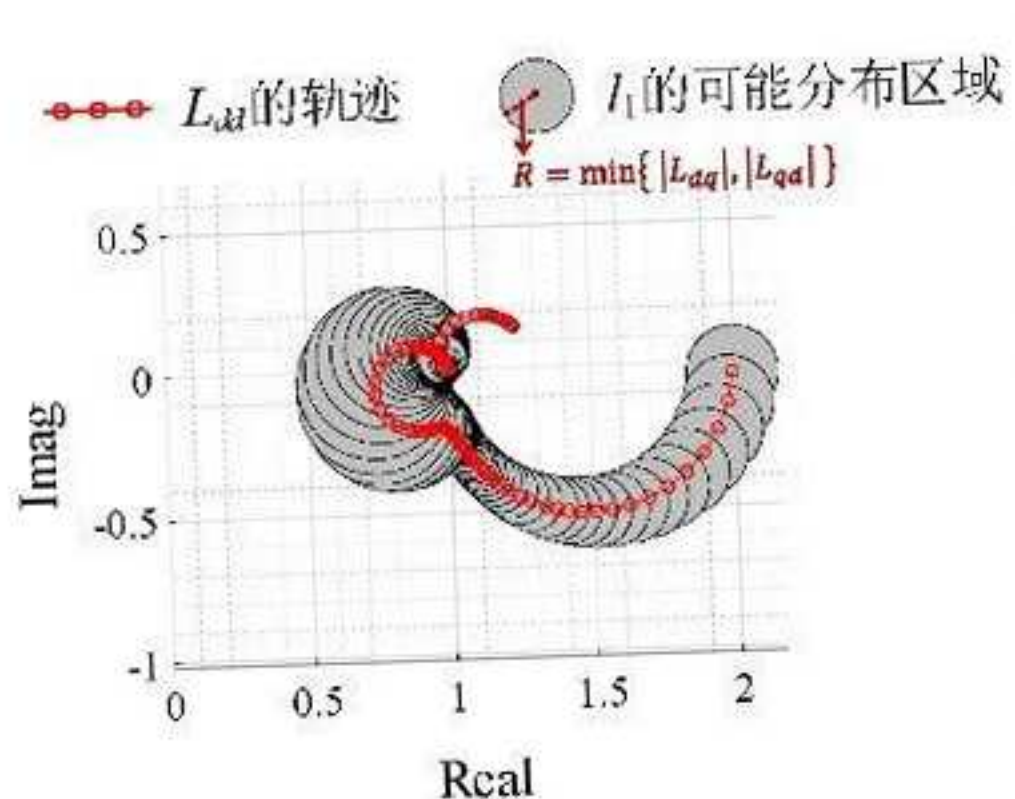
$$\mathbf{L} = (N-1) \cdot \mathbf{I} + \sum_{k=2}^N \underbrace{\left(\mathbf{G}_{io{k}} \cdot \begin{bmatrix} G_{oi{k}}^c - G_{oi1}^c & 0 \\ L_{Pdd} & 0 \\ L_{Pqd} & 0 \end{bmatrix} \right)}_{\text{回率矩阵简化}}$$

$$= \begin{bmatrix} (N-1) + L_{Pdd} & 0 \\ L_{Pqd} & (N-1) \end{bmatrix}$$

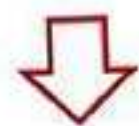


系统振荡分析

▪ 多变流器系统模型特性分析：基于盖尔圆定理的特征轨迹估计



$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} (N-1) + L_{pdd} & 0 \\ L_{pqd} & (N-1) \end{bmatrix}$$



$$\begin{cases} l_1 = L_{pdd} \\ l_2 = L_{pqq} = N - 1 \end{cases}$$

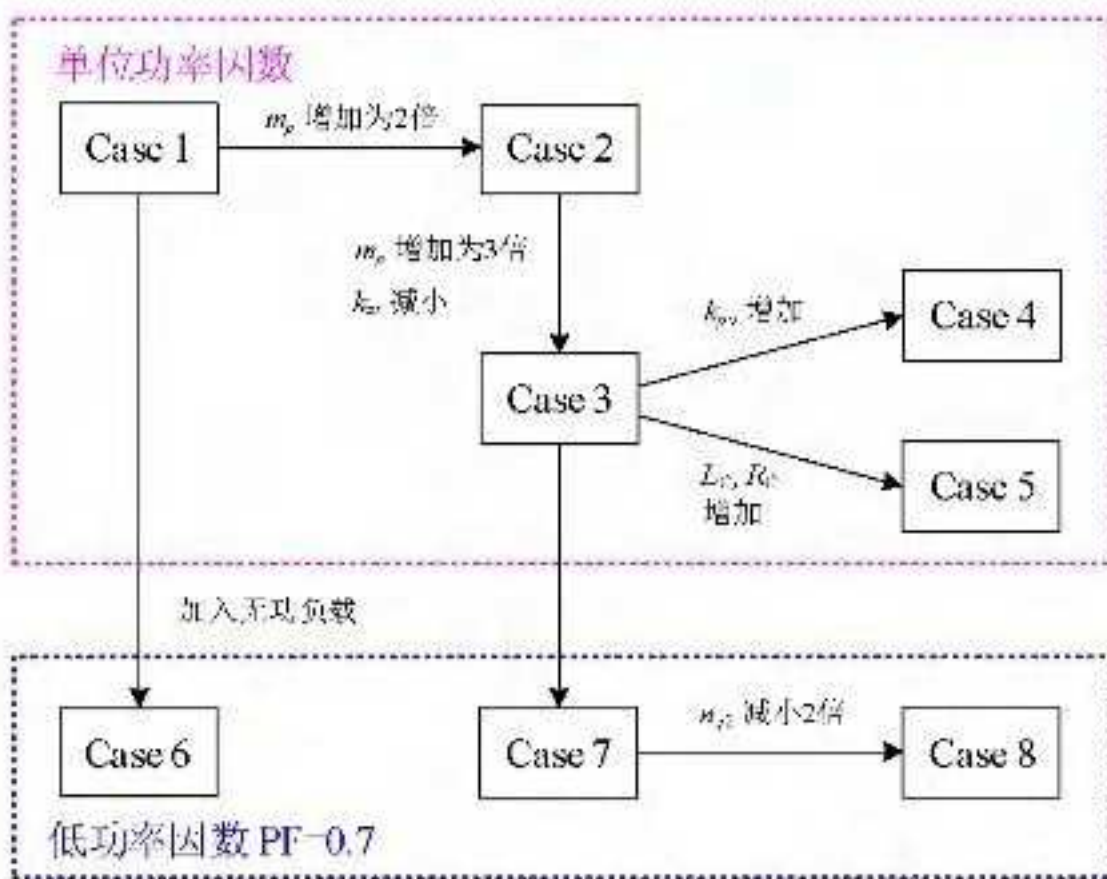
- 离网并联系统端口频率特性模型可从MIMO系统变换为SISO系统，有效简化系统振荡分析



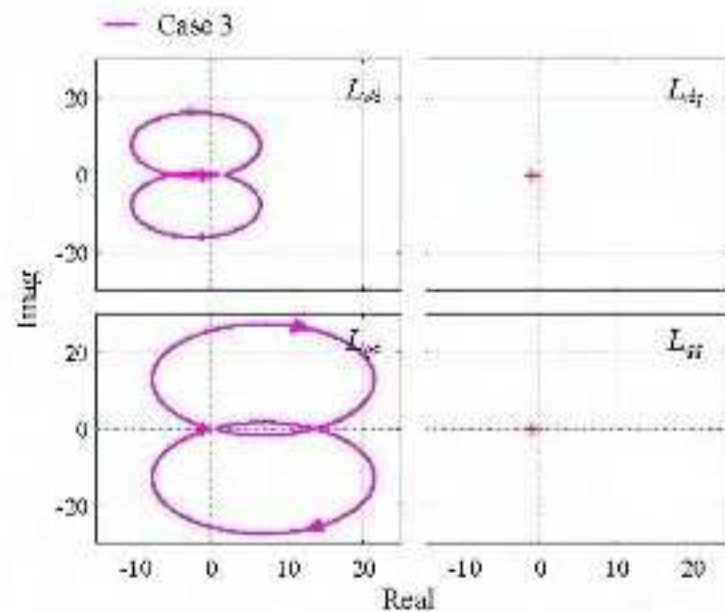
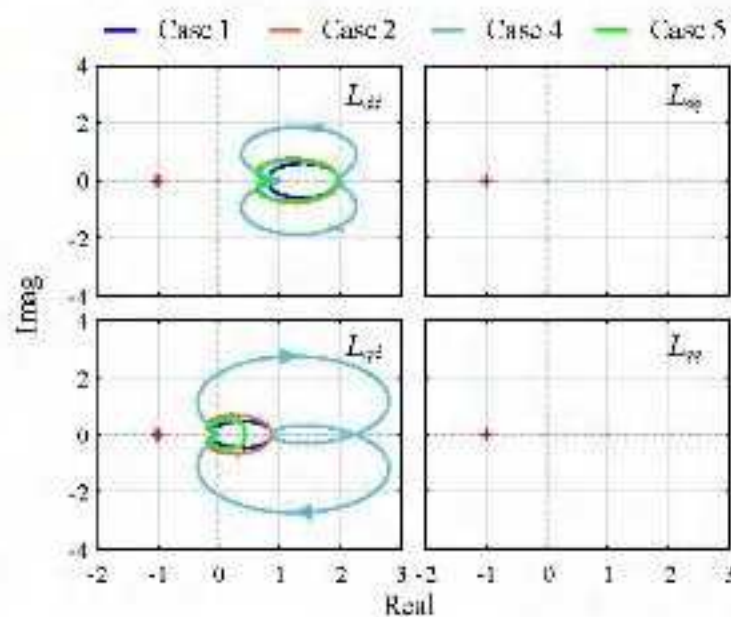
系统振荡分析

多变流器系统模型特性分析：实验验证

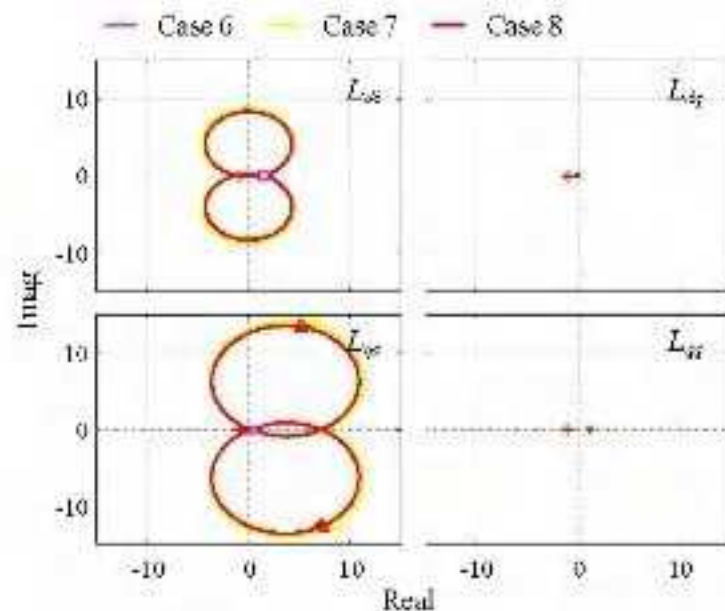
测试算例



回率矩阵各元素的奈奎斯特图



- 算例3和算例7、8
预测运行不稳定

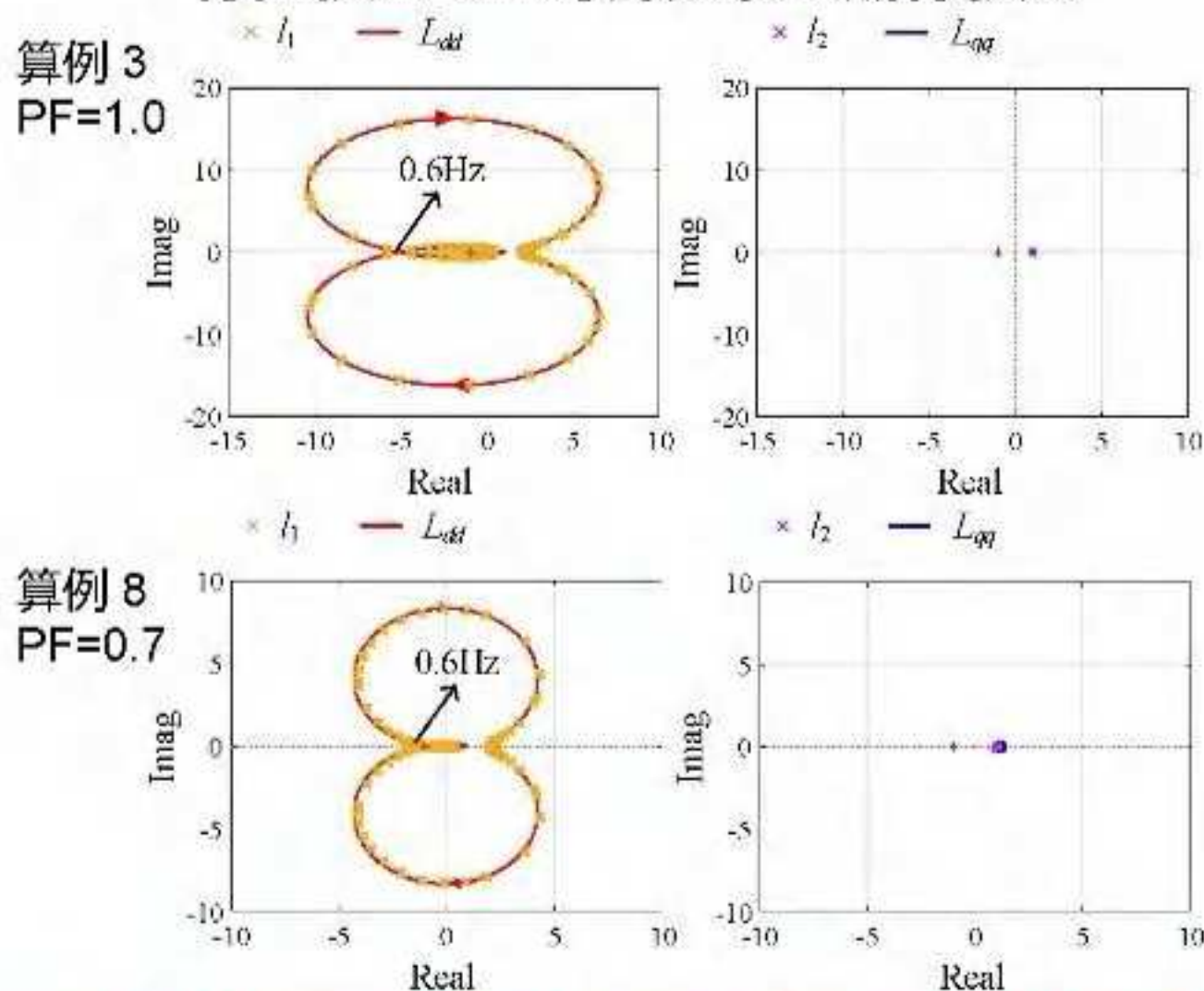


- 各算例下，**回率矩阵特性**均与理论分析结果一致
- 主对角元奈奎斯特轨迹**可判定系统稳定性

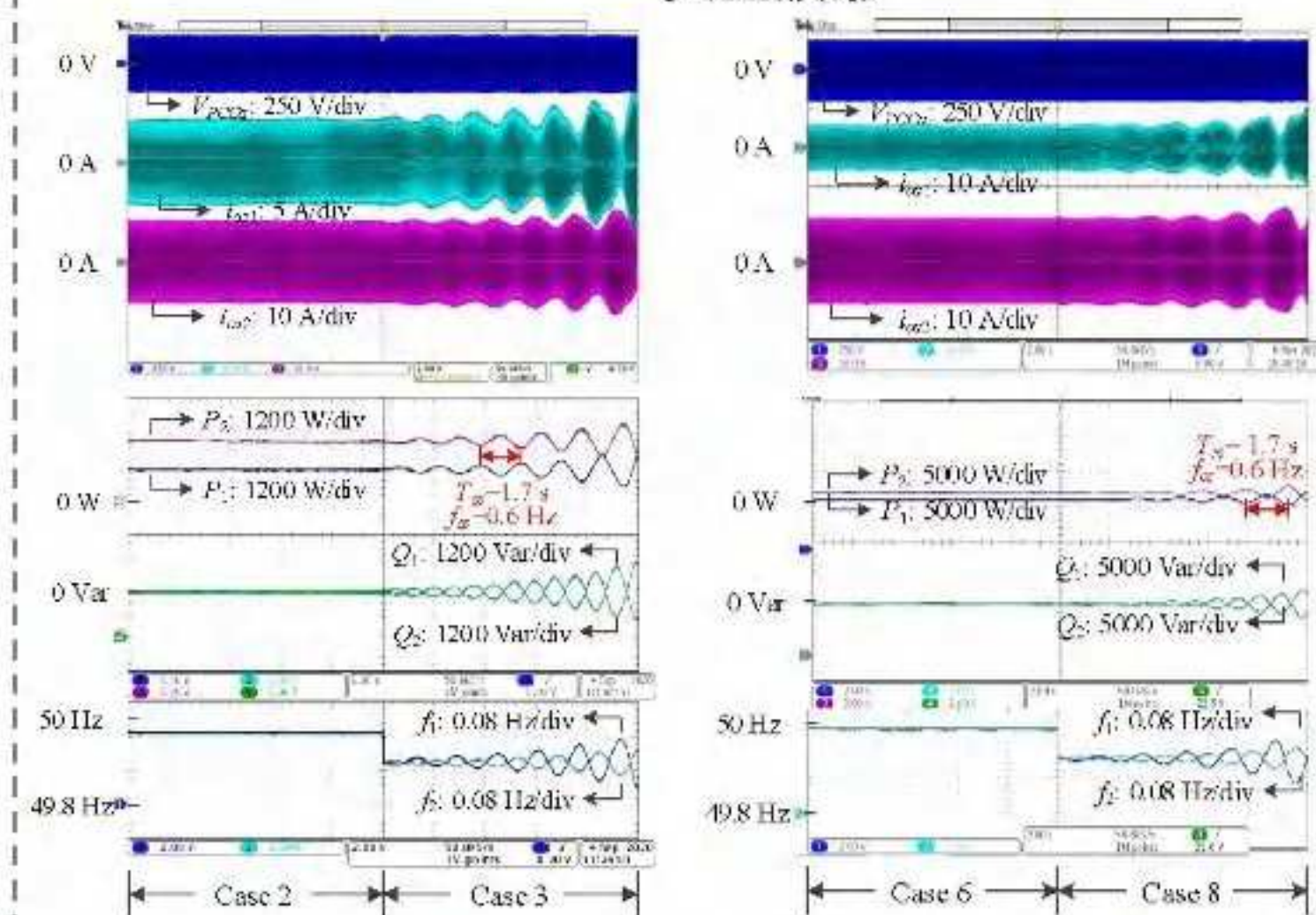
系统振荡分析

多变流器系统模型特性分析：实验验证

特征轨迹与主对角元奈奎斯特轨迹



实验波形



- 负载单位功率因数与低功率因数下，特征轨迹均与主对角元奈奎斯特轨迹一致
- 实验振荡频率与模型预测振荡频率一致



结论

- **对等架构多变流器系统较主从架构更适合分布式储能应用**
- **基于逐次逼近及交流小信号同步虚拟阻抗自适应调节方法不依赖于通讯及网络结构参数，能有效确保构网型储能变流器间无功及谐波功率的精确分配**
- **针对频率电压二次控制与功率分配之间耦合，基于交流小信号同步的二次控制方法可有效消除了二次控制对功率分配的影响，以实现储能系统电压质量提升**
- **对等架构多变流器系统中，变流器间存在基波频率动态相互作用，端口频率特性需对其进行刻画表征以确保系统振荡分析准确性；解析模型表明有功下垂通道显著强于无功下垂通道，可显著简化系统振荡分析**



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



电力电子与新能源技术研究中心
Power Electronics and Renewable Energy Center

谢谢，请各位专家批评指正！

第二十一届中国电气自动化与电控系统学术年会
储能与综合能源专题

2024.5.25 • 天津