风光储集成化微电网稳定性分析与致稳控制

汇报人：王睿

单　位：电气自动化研究所



汇报提纲

01 个人简介

02 研究背景

03 主要成果

04 参考文献

个人介绍



王睿

中共党员

教育经历

- 2012-2016 东北大学 学士
- 2019-2020 新加坡南洋理工大学 联合培养
- 2016-2021 东北大学 博士

工作经历

- 2024-至今 东北大学 研究生院培养办主任
- 2024-至今 东北大学 特聘研究员
- 2023-2024 东北大学 副教授
- 2021-2022 东北大学 讲师

汇报提纲

01 个人简介

02 研究背景

03 主要成果

04 参考文献

02 研究背景

“优化整合电源侧、电网侧、负荷侧资源，**构建源网荷储高度融合、协同互动的供给新形态**。因地制宜**建设智能微电网**，促进新能源就地消纳。”

——《中国的能源转型》白皮书

电力系统强度下降 ⇒ 微网阻抗不匹配

风光电源

风电



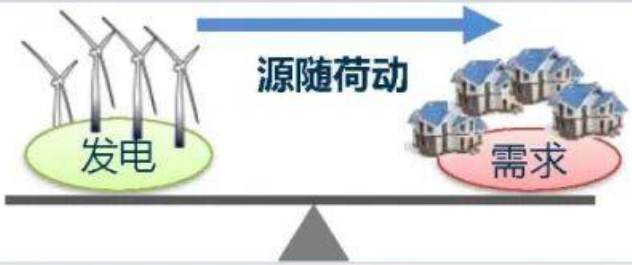
光伏



电力电子设备构网



源侧调节能力下降 ⇒ 微网供需不匹配



阻抗不匹配事故

供需不匹配事故

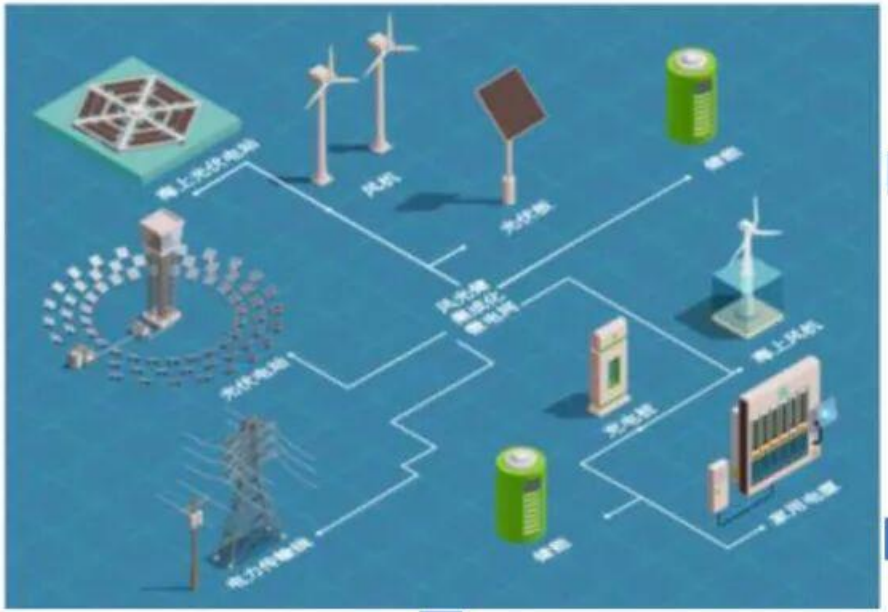


微网阻抗不匹配	微网供需不匹配
2018美国加州微电网失稳	2020吉辽等微电网限电
2023湖南微电网失稳起火	2022四川微电网缺电
2024杭州微电网失稳触电	2023蒙西微电网失衡

02 研究背景

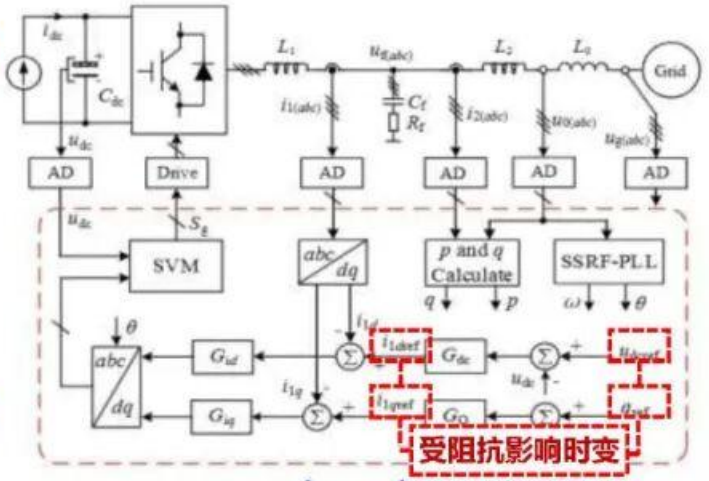
技术挑战 1：针对阻抗不匹配的控制器设计难

- 源-载电力电子化和随机波动致使**等效阻抗等基准参数实时变化并诱发失稳**，传统控制器**无法实现参数时变系统的稳定运行与致稳控制**。



风光储集成化微电网结构示意图

风光发电并网等效控制结构

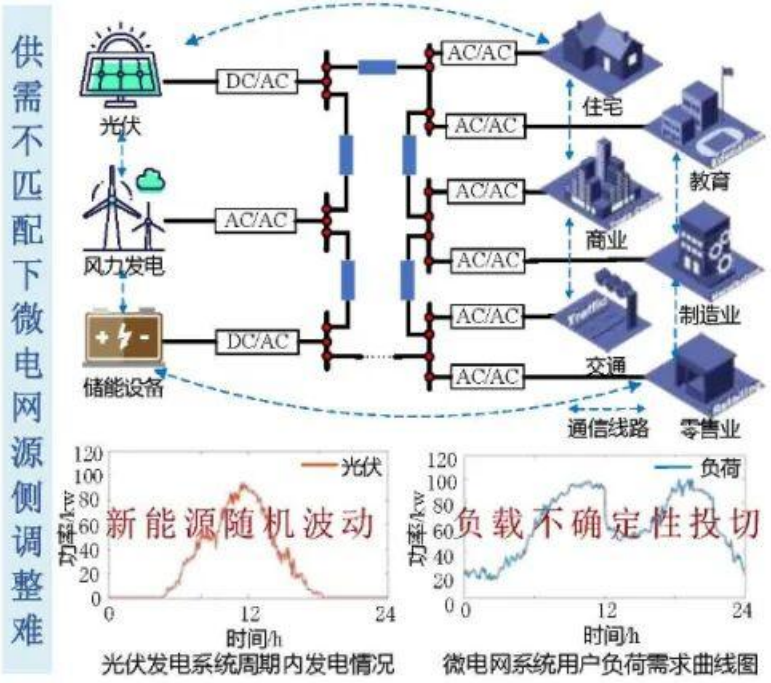


参数时变，致稳控制无法实现

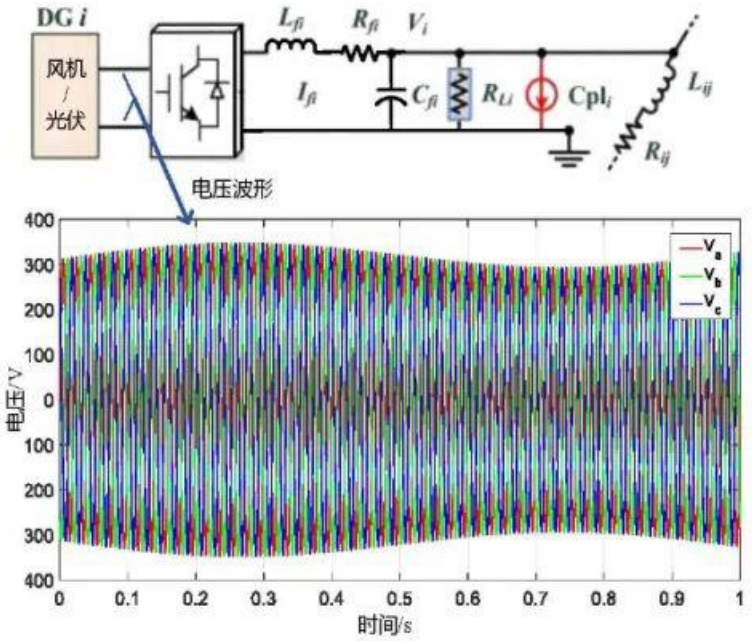
02 研究背景

技术挑战 2：针对供需不匹配的源侧调整难

- 风光等可再生能源随机波动且线路阻抗不均衡，传统分布式协同控制**无法同时解决含领导者电压恢复和无领导者功率均衡问题。**



供需不匹配示意图

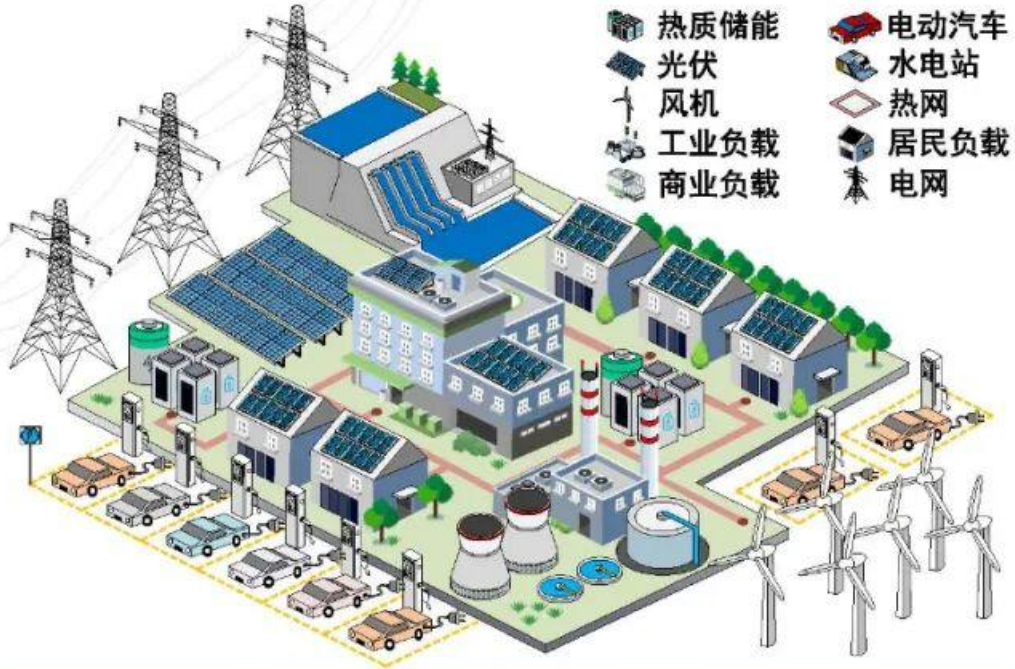


微电网供电质量降低

02 研究背景

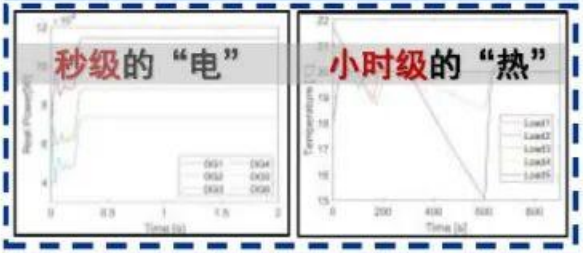
技术挑战 3：针对供需不匹配的载侧调整难

- 微电网系统包含新能源类电源和热力系统等柔性负荷，然而**传统载侧分钟级和小时级的调度技术难以满足供需实时平衡**。



含热力单元类柔性负荷的微网结构

热能调控难实时平衡供需



电/热系统量纲不统一



电功率平衡难以实现

汇报提纲

01 个人简介

02 研究背景

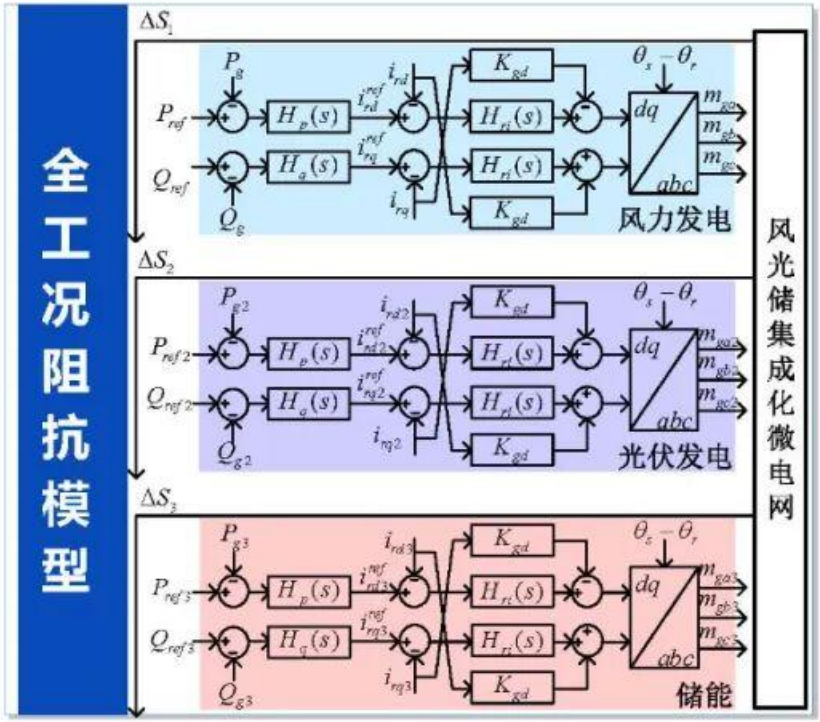
03 主要成果

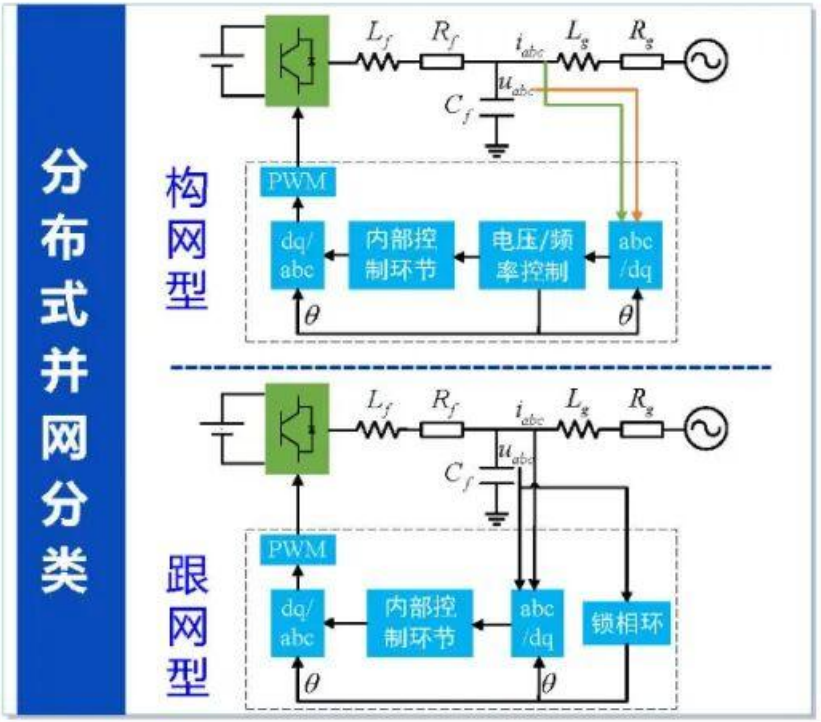
04 参考文献

03 主要成果

1. 阻抗不匹配—微电网系统建模及其致稳控制技术

- **建立全工况分布式风光并网模型**»»»»提出工程化参数稳定区间选取技术»»»»设计阻抗重塑致稳控制算法



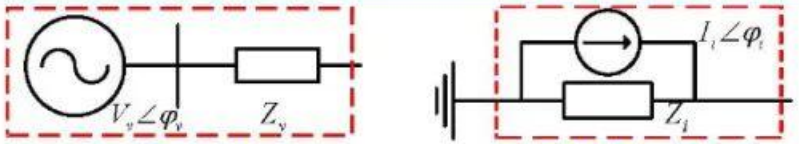


03 主要成果

1. 阻抗不匹配—微电网系统建模及其致稳控制技术

- **建立全工况分布式风光并网模型»»»»提出工程化参数稳定区间选取技术»»»»设计阻抗重塑致稳控制算法**

微网系统模型降阶与频域转换



构网等效　　跟网等效

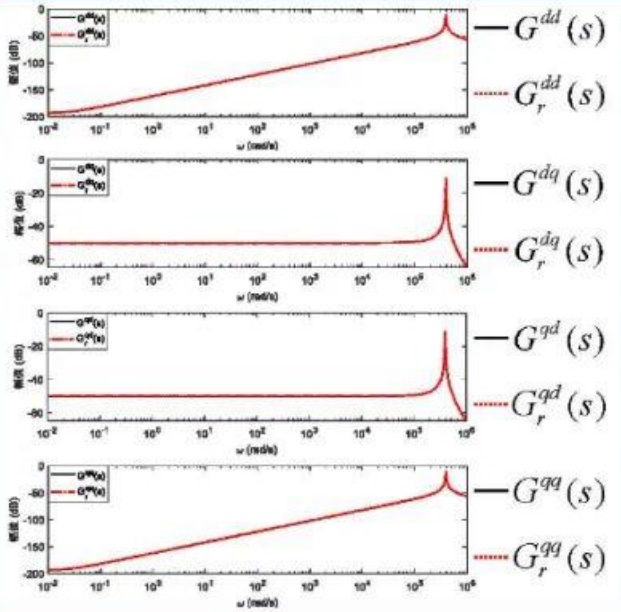
$$\begin{cases} E_n \cdot \Delta\dot{X}_n = A_n \cdot \Delta X_n + B_m \cdot \Delta u_m \\ \Delta y_p = C_n \cdot \Delta X_n + D_m \cdot \Delta u_m \end{cases}$$

$$G(s) = C_n(s \cdot E_n - A_n)^{-1} B_m + D_m$$ 频域转换

系统降阶

$$\begin{cases} U^T L = W \Sigma Y^T = \begin{bmatrix} W_1 & W_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1^T \\ Y_2^T \end{bmatrix} \\ \Sigma = \mathrm{diag}[\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_n] \end{cases} \quad \begin{cases} T_L = L Y_1 \Sigma_1^{-\frac{1}{2}} \\ T_R = U W_1 \Sigma_1^{-\frac{1}{2}} \end{cases}$$

模型精确度评估

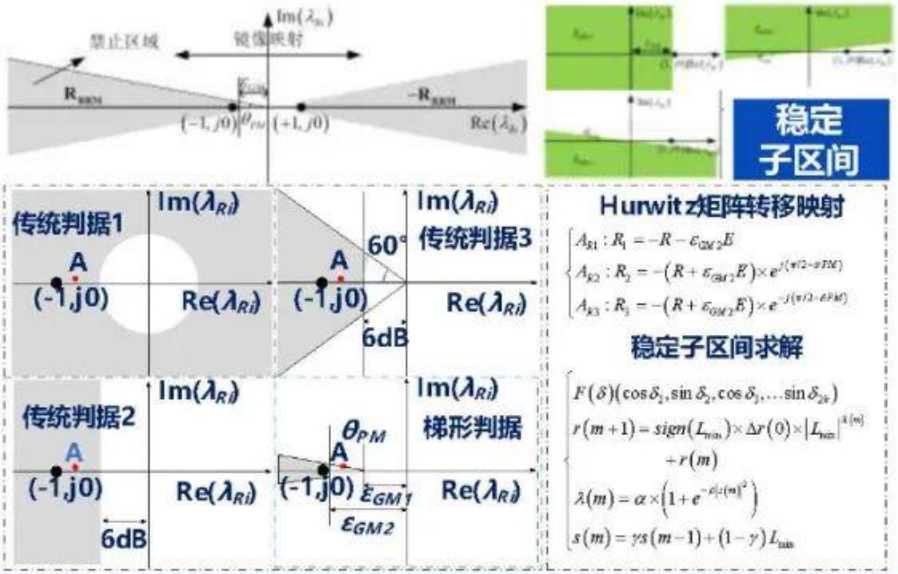


03 主要成果

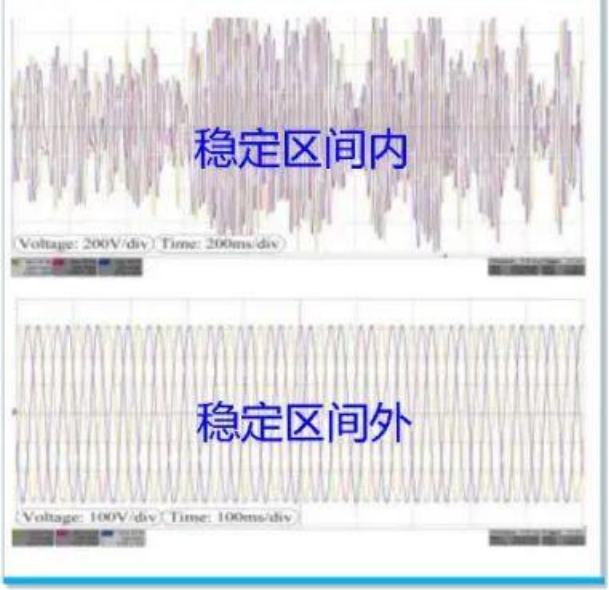
1. 阻抗不匹配—微电网系统建模及其致稳控制技术

- 建立全工况分布式风光并网模型»»»»提出工程化参数稳定区间选取技术»»»»设计阻抗重塑致稳控制算法

提出的参数稳定区间选取方法



稳定区间测试结果对比



支撑成果：**王睿**，孙秋野，马大中, et al. Line impedance cooperative stability region identification method for grid-tied inverters under weak grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2856-2866.

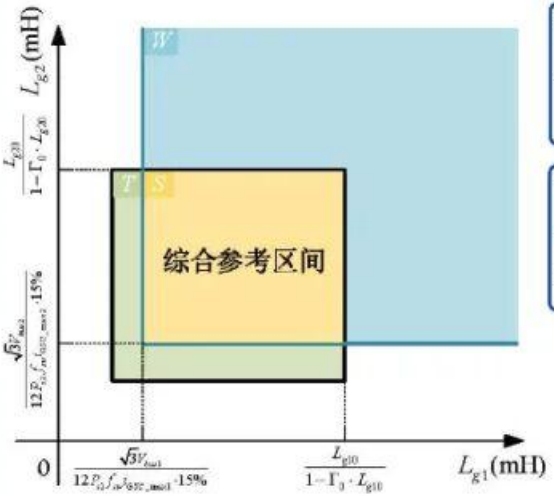
03 主要成果

1. 阻抗不匹配—微电网系统建模及其致稳控制技术

- 建立全工况分布式风光并网模型»»»»提出工程化参数稳定区间选取技术»»»»设计阻抗重塑致稳控制算法

提出的参数稳定区间选取方法

工程化参数-风机滤波电感实例



传统限制区间W

$$i_{GSC_max}=\frac{P_s}{3V_s}$$ 最大电流约束

$$L_g>\frac{\sqrt{3}V_{bus}}{12P_s f_{sw} i_{GSC_max}\xi}$$ 系统纹波约束

交集 $S=W\cap T$

系统稳定区间T

$$\frac{L_{g10}}{1+\Gamma_0\cdot L_{g10}}<L_{g1}<\frac{L_{g10}}{1-\Gamma_0\cdot L_{g10}}$$

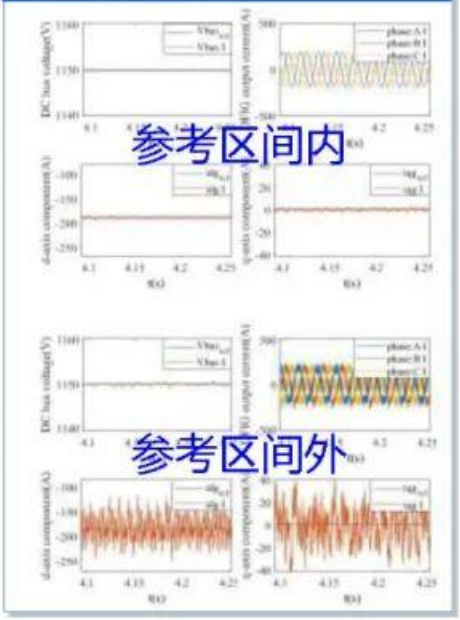
$$\frac{L_{g20}}{1+\Gamma_0\cdot L_{g20}}<L_{g2}<\frac{L_{g20}}{1-\Gamma_0\cdot L_{g20}}$$

综合参考区间S

$$\frac{\sqrt{3}V_{bus1}}{12P_{s1}f_{sw}i_{GSC_max1}\cdot 15\%}<L_{g1}<\frac{L_{g10}}{1-\Gamma_0\cdot L_{g10}}$$

$$\frac{\sqrt{3}V_{bus2}}{12P_{s2}f_{sw}i_{GSC_max2}\cdot 15\%}<L_{g2}<\frac{L_{g20}}{1-\Gamma_0\cdot L_{g20}}$$

测试结果对比



支撑成果：**王睿**, 于潇寒, 孙秋野, et al. The Integrated Reference Region Analysis for Parallel DFIGs' Interfacing Inductors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 7632-7642.

03 主要成果

1. 阻抗不匹配—微电网系统建模及其致稳控制技术

- 建立全工况分布式风光并网模型»»»»提出工程化参数稳定区间选取技术»»»»设计阻抗重塑致稳控制算法

分布式风光并网统一阻抗模型

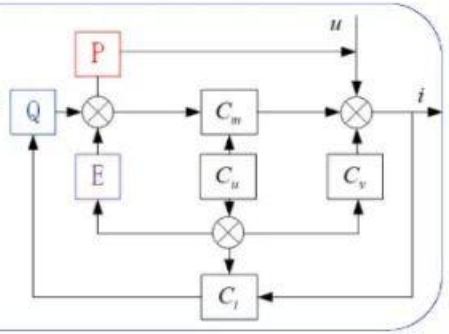
$$\begin{cases}\hat{i}_s = Y_1[(V_c\hat{m}_s + M_s\hat{v}_c) - \hat{v}_s] \\ \hat{v}_c = -Z_c(I_s\hat{m}_s + M_s\hat{i}_s)\end{cases}$$

$$y = \left\{ Y_i e^{j\alpha_i} \,\middle|\, f = f_p - f_i, i = 0, \pm 1, \cdots \right\}$$

谐波向量

统一阻抗模型

$$\hat{m} = Q\hat{i} + P\hat{v}_p + E\hat{v}_i$$



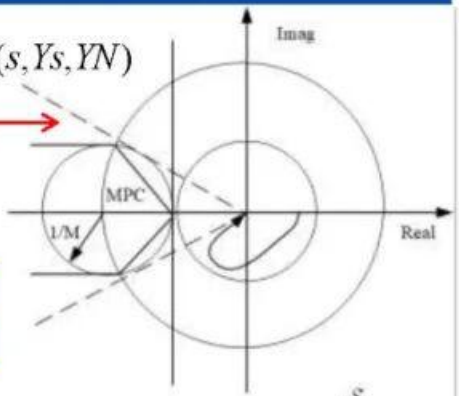
$$\begin{cases}Z_p(s) = v_p / i_p \\ Z_c(s) = v_p / i_c\end{cases}$$

多维稳定评估方法

$$\begin{cases}Sys. \quad Ys(s), YN(s) \Rightarrow P(s, Ys, YN) \\ s.t. \quad KCL, KVL\end{cases}$$

稳定函数

等价稳定性判据



$$L(s) = \{Z_{net}Y_s\} = V(s)\Lambda(s)W(s)$$

$$PM(j\omega_c) \qquad n_i = \frac{\delta_i}{\sqrt{\delta_i^2 + \omega_i^2}}$$

$$U(s) = [e + L(s)]Z_{net}(s)I(s)$$

等价稳定性分析

$$\det(\lambda e - L(s)) = 0 \Rightarrow \{s = \lambda | \lambda_1, \lambda_2, \cdots\}$$

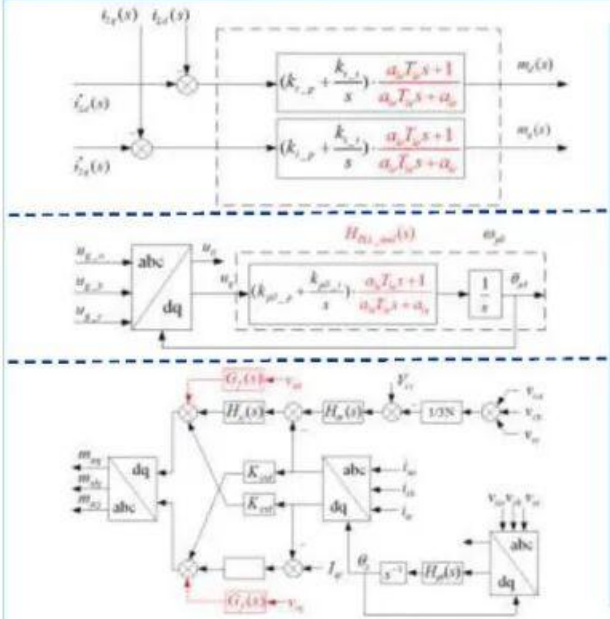
支撑成果：**王睿**, 于潇寒, 孙秋野, et al. The Integrated Reference Region Analysis for Parallel DFIGs' Interfacing Inductors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 7632-7642.

03 主要成果

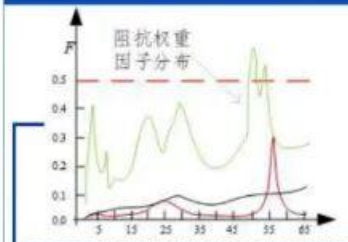
1. 阻抗不匹配—微电网系统建模及其致稳控制技术

- 建立全工况分布式风光并网模型»»»»提出工程化参数稳定区间选取技术»»»»设计阻抗重塑致稳控制算法

单机阻抗重塑致稳控制策略



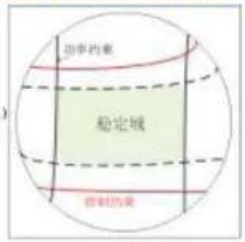
多机阻抗协同自治致稳控制策略



阻抗权重辨识

$$F=k_i\frac{|P_{in}|}{\sum_{i=1}^{N}P_{in}},k\text{为权重因子}\Rightarrow\begin{bmatrix}Y_v\\Y_p\end{bmatrix}=Y_{i2}(s)$$

$$Z_m(m,s)=\frac{Z_m(m_0+\Delta m,s)-Z_m(m_0-\Delta m,s)}{2\Delta m}\Rightarrow Y_{in}$$



稳定约束刻画

$$\begin{cases}\mathrm{Re}:H_{\mathrm{Re}}(cl,st,op)\\ \mathrm{Im}:H_{\mathrm{Im}}(cl,st,op)\\ s.t.\min(PM)\approx 0\end{cases}\quad\begin{cases}cl:\{k_1,k_2,\cdots\}\\ st:\{m_1,m_2,\cdots\}\\ op:\{n_1,n_2,\cdots\}\end{cases}$$

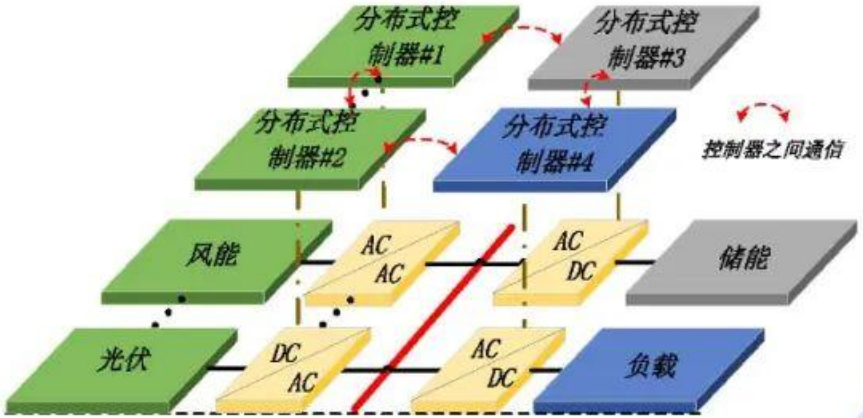
基于稳定方程集的局部最优

$$\max J_m(s_i,\{AM(s_i)\},\{PM(s_i)\},\{E_0\})\quad s.t.\begin{cases}\Delta(s_i,\{AM(s_i)\},\{PM(s_i)\},\{E_0\})\le\varepsilon\\ O(s_i,\{AM(s_i)\},\{PM(s_i)\},\{E_0\})\ge O_{\min}(s_i)\end{cases}$$

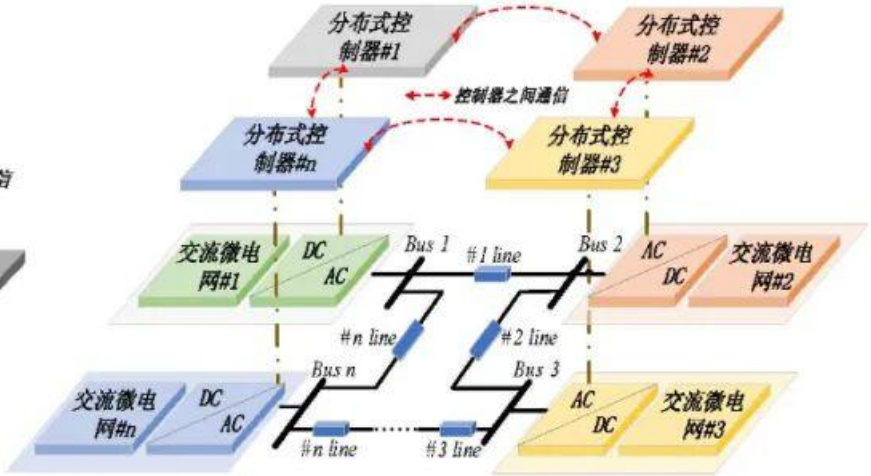
$$s\in\{\det|Y(s)|=0,s_i+\sigma_i\pm j\omega_i\}$$

2. 供需不匹配—源侧类脉冲协同控制策略

- **构建微电网即插即用式状态方程模型»»»»提出微网母线内类脉冲协同控制»»»»设计微网母线间类脉冲协同控制**



交流微电网母线内结构示意图

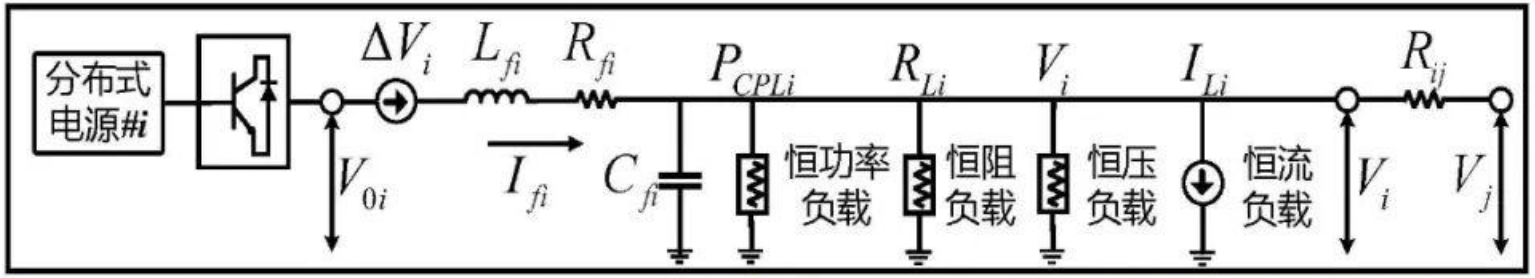


交流微电网母线间结构示意图

03 主要成果

2. 供需不匹配—源侧类脉冲协同控制策略

- **构建微电网即插即用式状态方程模型»»»»提出微网母线内类脉冲协同控制»»»»设计微网母线间类脉冲协同控制**



下垂控制模型

$$V_i = V_{ni} - n_{Q_i} Q_i + \Delta V_{oi}(t)$$

$$\Delta V_{oi}(t) = K^P u_i(t) + K^I \int_0^t u_i(t)dt$$

协同控制模型

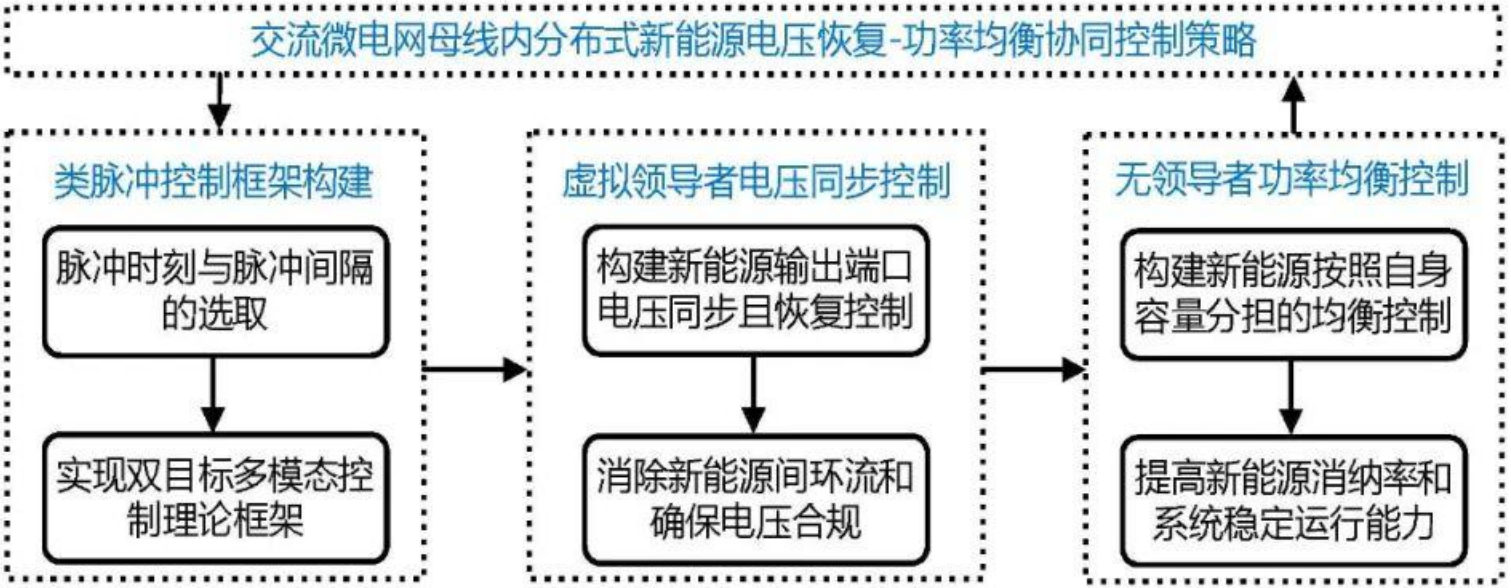
$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + A_{ij}(x_i(t) - x_i(t)) + B_i u_i(t) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) \end{cases} \quad \frac{1}{T}\int_0^T \sum A_{ij}\left(x_i(t) - x_j(t)\right)dt < \infty$$

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + B_i u_i(t) + D_i \omega_i(t) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) \end{cases}$$

03 主要成果

2. 供需不匹配—源侧类脉冲协同控制策略

- **构建微电网即插即用式状态方程模型»»»»提出微网母线内类脉冲协同控制»»»»设计微网母线间类脉冲协同控制**

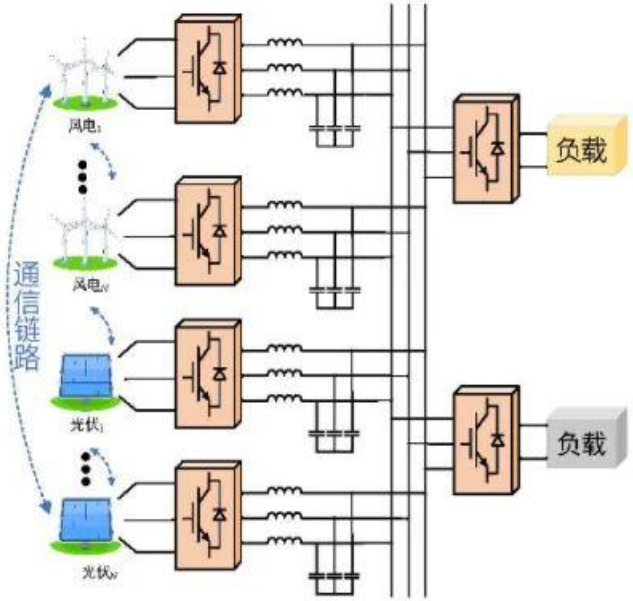


$$y_i(t)=y_{i1}(t)+y_{i2}(t) \Rightarrow \begin{cases} y_{i1}(t)=[n_iQ_i,0]^T \\ y_{i2}(t)=[0,V_i]^T \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_{i1}(t)=y_{j1}(t) \\ y_{i2}(t)=y_{j2}(t)=V_{额定值} \end{cases}$$

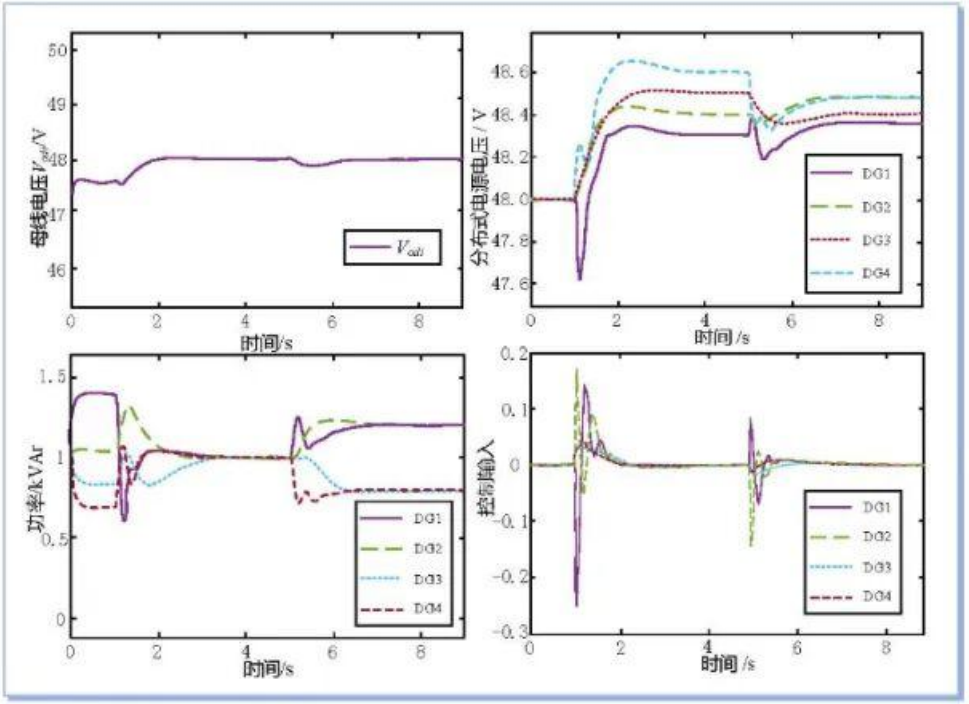
03 主要成果

2. 供需不匹配—源侧类脉冲协同控制策略

- **构建微电网即插即用式状态方程模型»»»»提出微网母线内类脉冲协同控制»»»»设计微网母线间类脉冲协同控制**



微电网母线内拓扑结构



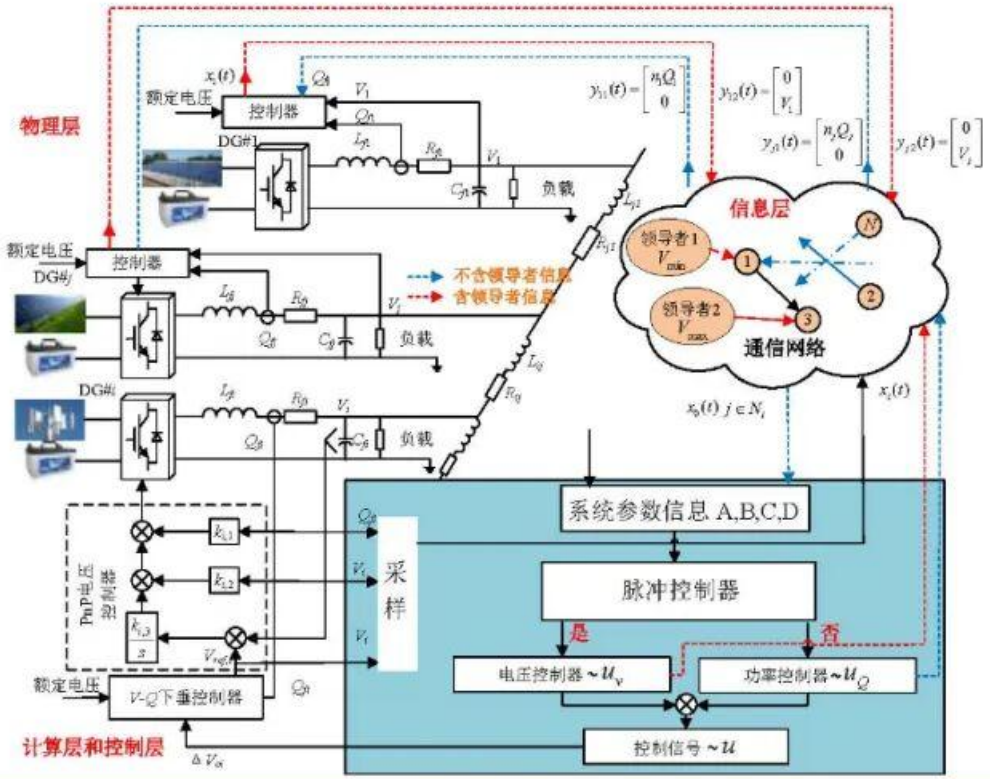
支撑成果：**王睿**, 田旭, 孙秋野, et al. Voltage Containment and Current Sharing in Multi-Bus DC Microgrids: Both Leader and Non-leader Impulse-like Control Scheme, The Innovation Energy, 2024, online.

03 主要成果

2. 供需不匹配—源侧类脉冲协同控制策略

- 构建微电网即插即用式状态方程模型»»»»提出微网母线内类脉冲协同控制»»»»设计微网母线间类脉冲协同控制

母线间类脉冲协同控制示意图



$$y_i(t) = y_{i1}(t) + y_{i2}(t)$$

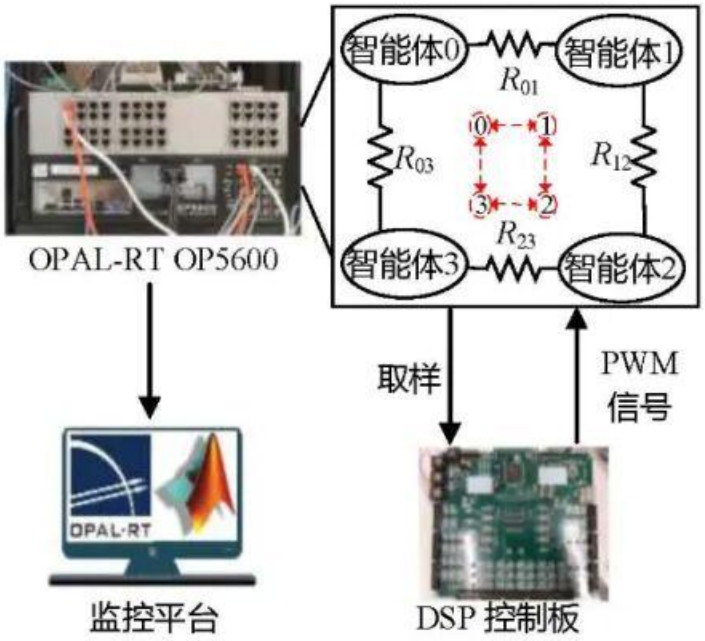
$$\begin{cases} y_{i1}(t) = [n_i Q_i, 0]^T \\ y_{i2}(t) = [0, V_i]^T \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_{i1}(t) = y_{f1}(t) \\ y_{i2}(t) \in [V_{\min}, V_{\max}] \end{cases}$$

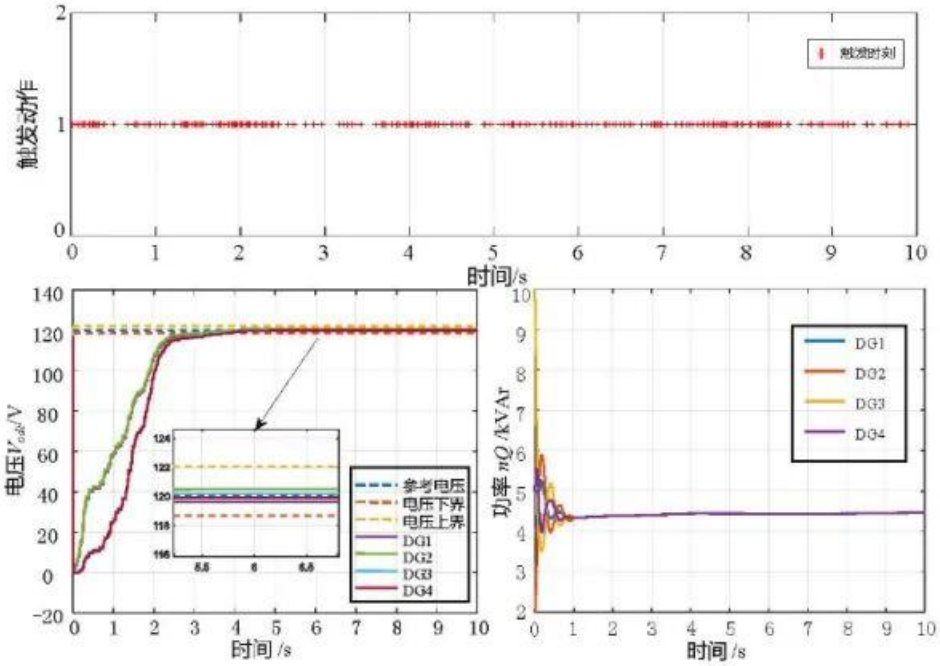
03 主要成果

2. 供需不匹配—源侧类脉冲协同控制策略

- 构建微电网即插即用式状态方程模型»»»»提出微网母线内类脉冲协同控制»»»»设计微网母线间类脉冲协同控制



微电网母线间实验平台

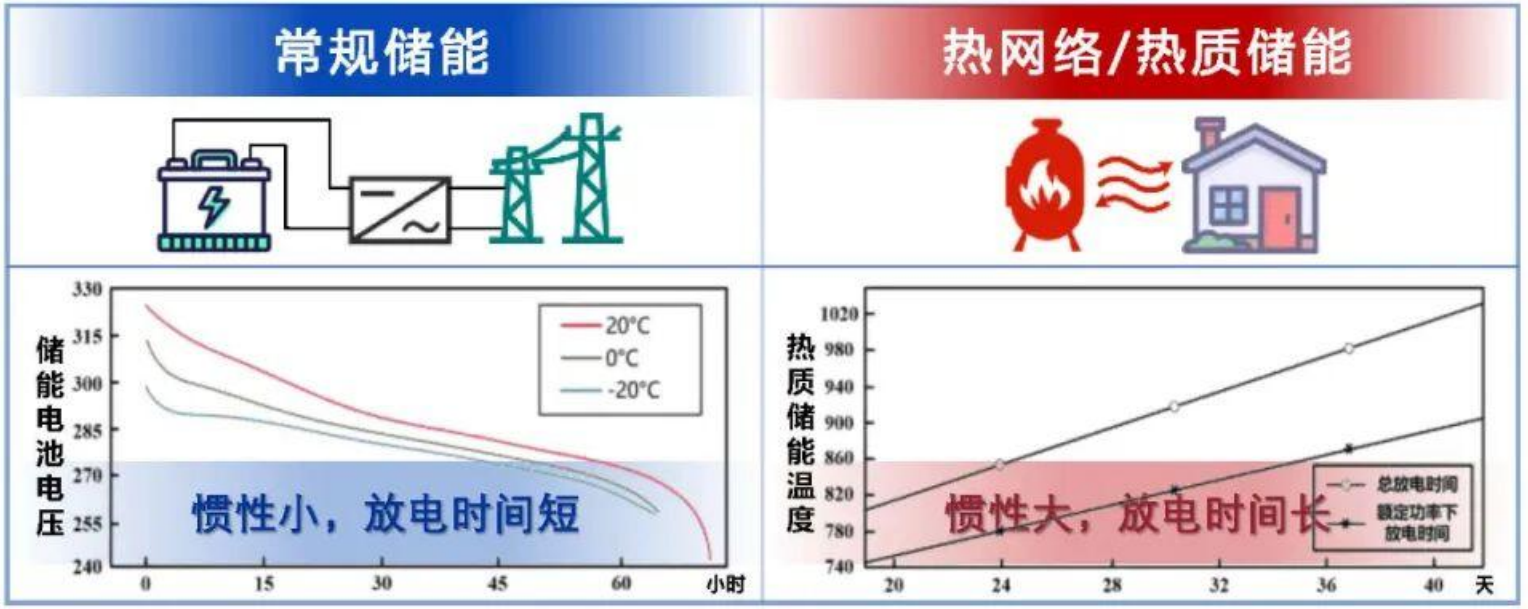


实验验证

03 主要成果

3. 供需不匹配—载侧虚拟云储能实时控制策略

- **构建虚拟云储能定义及模型**»»»»提出热网络类柔性负荷的虚拟异步机控制技术»»»»设计热质储能的虚拟异步/同步机控制技术



常规储能受限于 放电时间短，惯性低，难以满足大规模储能需求！

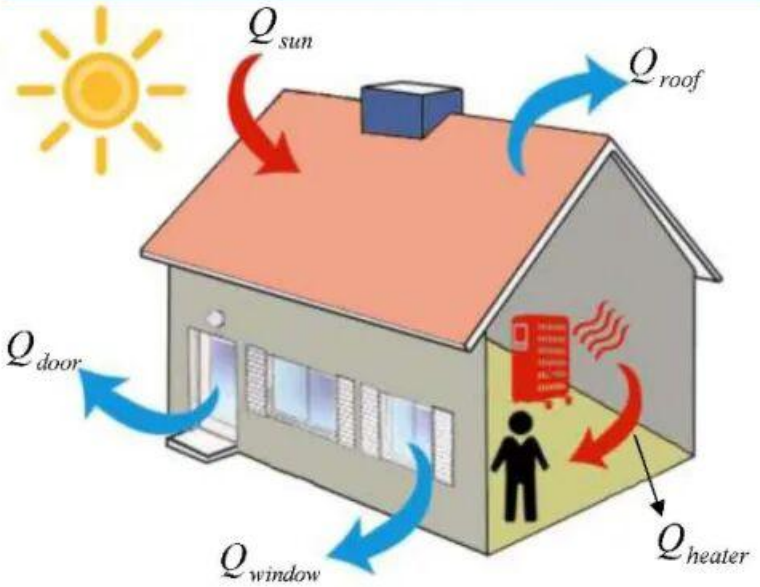
创新思路：把大惯性的热网络/热质储能作为虚拟云储能

03 主要成果

3. 供需不匹配—载侧虚拟云储能实时控制策略

- **构建虚拟云储能定义及模型»»»»提出热网络类柔性负荷的虚拟异步机控制技术»»»»设计热质储能的虚拟异步/同步机控制技术**

虚拟云储能系统模型



虚拟云储能系统内部温度 T_{sys}

损失的热量 $Q_{loss}=Q_{roof}+Q_{window}+Q_{door}$

增加的热量 $Q_{gain}=Q_{sun}+Q_{heater}$

情况一 如果 $dT_{sys}>0$

即 $d(Q_{gain}-Q_{loss})>0$

虚拟充电 **虚拟储能系统充电**

情况二 如果 $dT_{sys}<0$

即 $d(Q_{gain}-Q_{loss})<0$

虚拟放电 **虚拟储能系统放电**

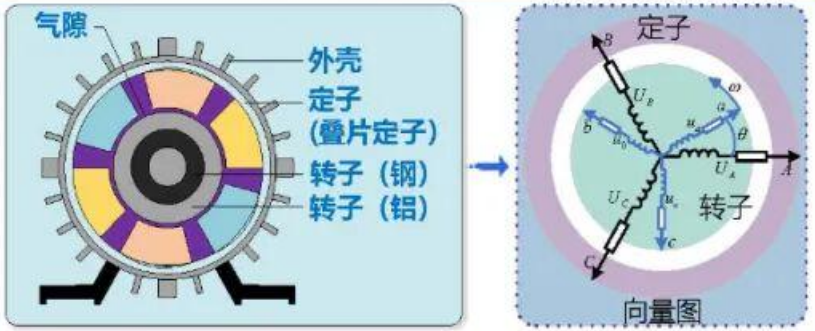
支撑成果：王怡博，**王睿***，et al. Damp and droop coefficient stability region analysis for interlinking converters with virtual asynchronous machine controllers in virtual energy storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 99: 113306.

03 主要成果

3. 供需不匹配—载侧虚拟云储能实时控制策略

- 构建虚拟云储能定义及模型»»»»提出热网络类柔性负荷的虚拟异步机控制技术»»»»设计热质储能的虚拟异步/同步机控制技术

异步电机数学模型



$$u_{s\text{-}d} = R_s i_{s\text{-}d} + \rho\psi_{s\text{-}d} - \omega_{norm}\psi_{s\text{-}q} \qquad \psi_{s\text{-}d} = L_s i_{s\text{-}d} + L_m i_{r\text{-}d}$$

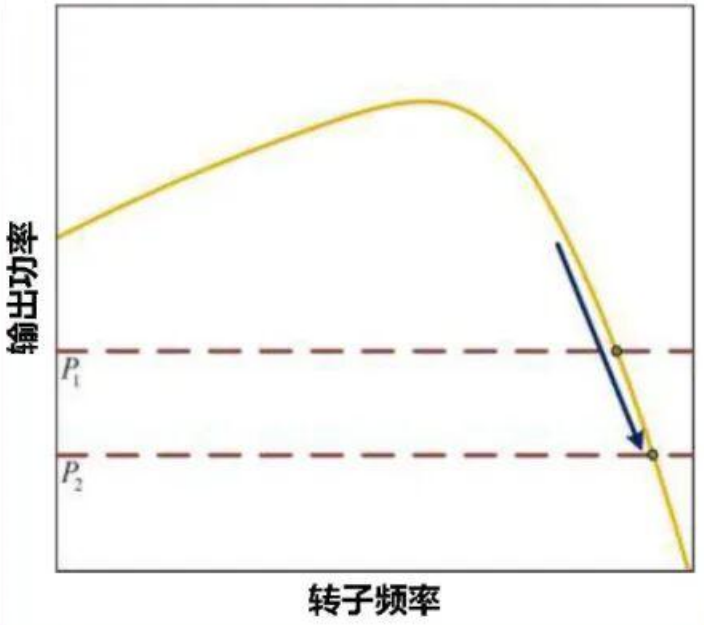
$$u_{s\text{-}q} = R_s i_{s\text{-}q} + \rho\psi_{s\text{-}q} + \omega_{norm}\psi_{s\text{-}d} \qquad \psi_{s\text{-}q} = L_s i_{s\text{-}q} + L_m i_{r\text{-}q}$$

$$u_{r\text{-}d} = R_r i_{r\text{-}d} + \rho\psi_{r\text{-}d} - \Delta\omega\psi_{r\text{-}q} = 0 \qquad \psi_{r\text{-}d} = L_m i_{s\text{-}d} + L_r i_{r\text{-}d}$$

$$u_{r\text{-}q} = R_r i_{r\text{-}q} + \rho\psi_{r\text{-}q} + \Delta\omega\psi_{r\text{-}d} = 0 \qquad \psi_{r\text{-}q} = L_m i_{s\text{-}q} + L_r i_{r\text{-}q}$$

虚拟转矩表达式：$T_e = \frac{3}{2}(\psi_{s-d} i_{s-q} - \psi_{s-d} i_{s-d})$

输出功率与转子频率函数关系

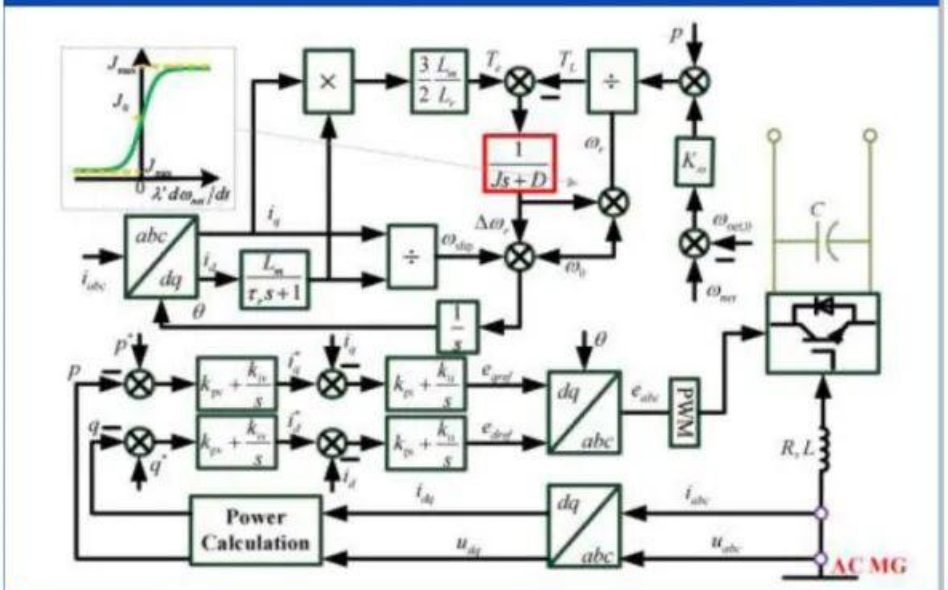


03 主要成果

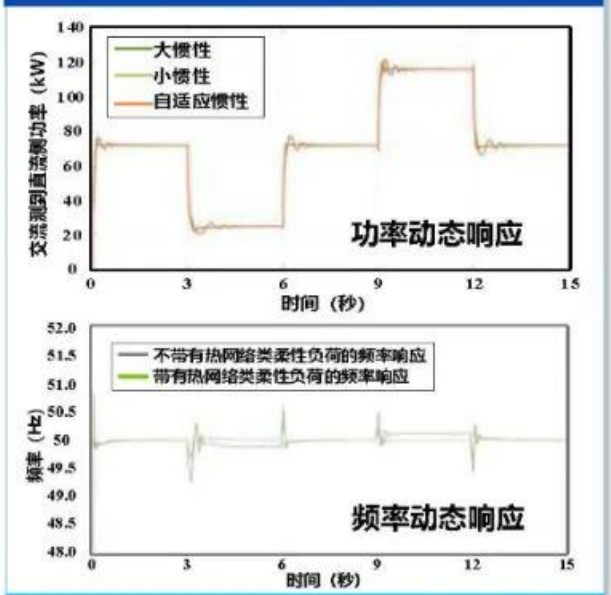
3. 供需不匹配—载侧虚拟云储能实时控制策略

- 构建虚拟云储能定义及模型»»»»提出热网络类柔性负荷的虚拟异步机控制技术»»»»设计热质储能的虚拟异步/同步机控制技术

热网络类柔性负荷的虚拟异步机控制技术



功率/频率动态响应结果



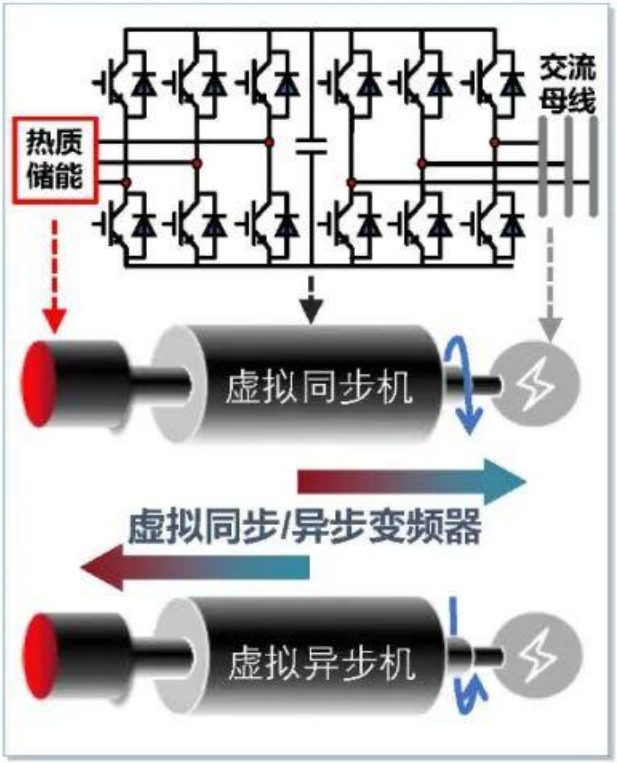
支撑成果：王睿, et al. A study of novel real-time power balance strategy with virtual asynchronous machine control for regional integrated electric-thermal energy systems[J]. Science China Technological Sciences, 2024, 67(7): 2074-2086.

03 主要成果

3. 供需不匹配—载侧虚拟云储能实时控制策略

- 构建虚拟云储能定义及模型»»»»提出热网络类柔性负荷的虚拟异步机控制技术»»»»设计热质储能的虚拟异步/同步机控制技术



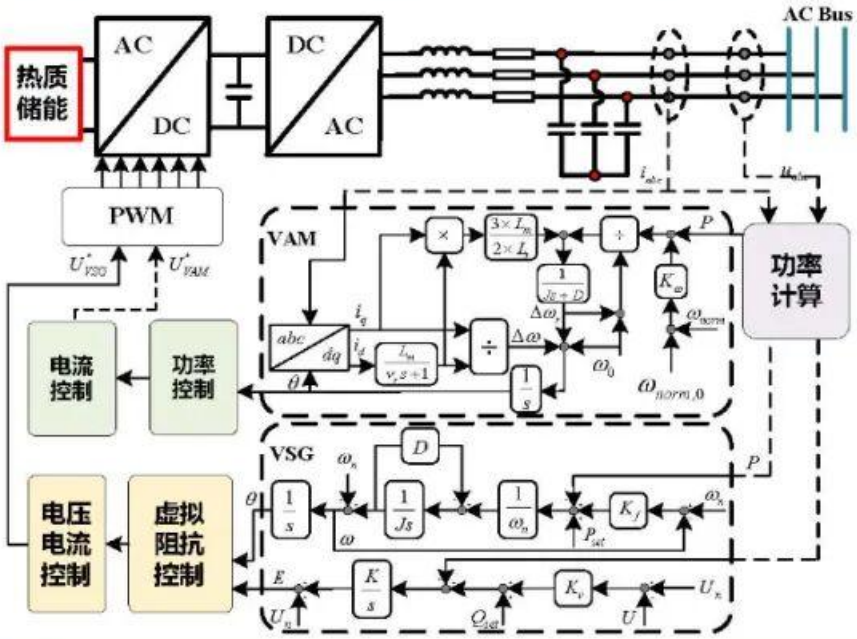


03 主要成果

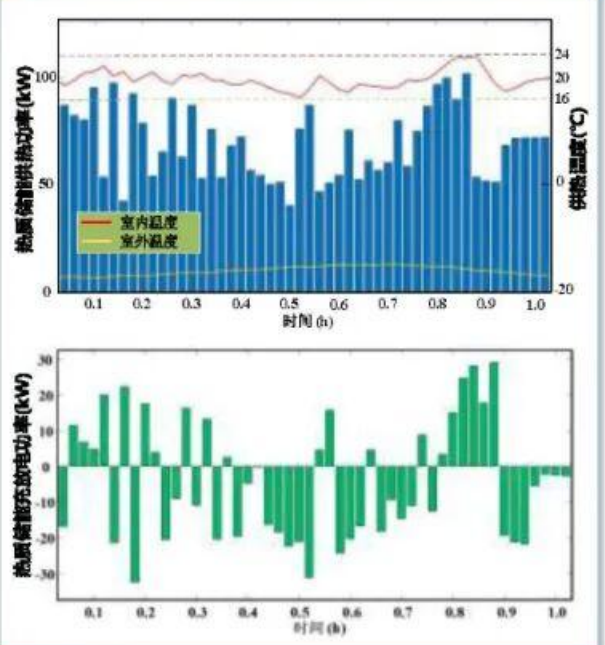
3. 供需不匹配—载侧虚拟云储能实时控制策略

- 构建虚拟云储能定义及模型»»»»提出热网络类柔性负荷的虚拟异步机控制技术»»»»设计热质储能的虚拟异步/同步机控制技术

热质储能的虚拟异步/同步机控制技术



热质储能充放电测试结果



汇报提纲

01 个人简介

02 研究背景

03 主要成果

04 参考文献

04 参考文献

1. **R. Wang**, Q. Sun, W. Hu, Y. Li, D. Ma and P. Wang, "SoC-Based Droop Coefficients Stability Region Analysis of the Battery for Stand-Alone Supply Systems With Constant Power Loads," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 7, pp. 7866-7879, July 2021
2. **R. Wang**, X. Yu, Q. Sun, D. Li, Y. Gui and P. Wang, "The Integrated Reference Region Analysis for Parallel DFIGs' Interfacing Inductors," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 6, pp. 7632-7642, June 2024
3. **R. Wang**, D. Ma, M. -J. Li, Q. Sun, H. Zhang and P. Wang, "Accurate Current Sharing and Voltage Regulation in Hybrid Wind/Solar Systems: An Adaptive Dynamic Programming Approach," in IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 68, no. 3, pp. 261-272, Aug. 2022
4. **R. Wang**, W. Li, Q. Sun, Y. Li, Y. Gui and P. Wang, "Fully Distributed Dynamic Edge-Event-Triggered Current Sharing Control Strategy for Multibus DC Microgrids With Power Coupling," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 19, no. 4, pp. 5667-5678, April 2023
5. Y. Wang, **R. Wang**, Q. Sun, M. -J. Li, P. Zhang and P. Wang, "A Power Balancing Strategy of Virtual Asynchronous Machine/Synchronous Generator for STEM During Full Operating Conditions," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 16, no. 6, pp. 4395-4407, Nov. 2025
6. R. Zhang, **R. Wang**, et al., "Distributed Secondary Frequency Restoration Control Based on Virtual Asynchronous Machines for Virtual Energy Storage Systems," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, doi: 10.35833/MPCE.2025.000426

衷心感谢各位专家评委！
请批评指正！

汇报人：王睿