

# 控制与决策

Control and Decision

## 考虑自治-互济的多园区端网协同弹性控制

刘鑫蕊, 李新宇, 郭亮亮, 王睿, 王冰玉, 孙秋野

引用本文:

刘鑫蕊, 李新宇, 郭亮亮, 等. 考虑自治-互济的多园区端网协同弹性控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(9): 2693-2700.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1350>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制

A fast distributed control of smart grids with nonlinear dynamic model

控制与决策. 2021, 36(8): 1849-1854 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1696>

#### 孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制

Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid

控制与决策. 2021, 36(8): 2034-2041 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0012>

#### 基于协同控制的串联超级电容电压均衡策略

Voltage equalization strategy for series-connected ultracapacitors based on cooperative control

控制与决策. 2021, 36(8): 1997-2001 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1736>

#### 基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability

控制与决策. 2021, 36(6): 1407-1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

#### 基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 885-892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

# 考虑自治-互济的多园区端网协同弹性控制

刘鑫蕊<sup>†</sup>, 李新宇<sup>1</sup>, 郭亮亮<sup>1</sup>, 王睿<sup>1</sup>, 王冰玉<sup>2</sup>, 孙秋野<sup>1</sup>

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819;

2. 新能源电力系统全国重点实验室 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 分布式能源广泛接入电网促使传统配电系统向园区级信息物理多微网过渡, 针对分布式资源接入交直流混合微电网后子网间功率交互的问题, 提出考虑自治-互济的多园区端网弹性协调控制策略, 保证孤岛下园区系统电能质量. 首先考虑子微网净功率和功率互济时最大传输功率作为约束条件, 将其划分为自治、过渡、互济 3 种运行模式, 根据不同模式设计储能的充放规则以及功率互济传输方向, 给出具体的切换策略; 然后在负荷端考虑重要负荷用电质量问题, 将反步控制应用到电力弹簧保持重要负荷电压期望轨迹稳定跟踪; 针对信息网络通信受阻问题, 提出分布式一致性模型预测补偿控制方法; 最后在 Matlab/Simulink 仿真平台验证了所提出控制策略的有效性和准确性.

**关键词:** 园区微电网; 自治-互济; 功率互济; 反步控制; 预测补偿控制; 弹性控制

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1350

引用格式: 刘鑫蕊, 李新宇, 郭亮亮, 等. 考虑自治-互济的多园区端网协同弹性控制 [J]. 控制与决策, 2025, 40(9): 2693-2700.

## Resilience cooperative control for MMG considering autonomy-mutual aid of edge-network

LIU Xin-rui<sup>†</sup>, LI Xin-yu<sup>1</sup>, GUO Liang-liang<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, WANG Bing-yu<sup>2</sup>, SUN Qiu-ye<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** With the wide access of distributed energy to power grids, the transition from traditional distribution systems to park-level information physical multi-microgrid is promoted. Aiming at the problem of power interaction between subnets after distributed resources are connected to the AC/DC hybrid microgrid, this paper proposes an resilience coordinated control strategy of multi-park end network considering autonomy and mutual benefit to ensure the power quality of the park system under the island. Firstly, considering the net power and the maximum transmission power of the sub-grid as constraints, the sub-grid is divided into three operation modes: autonomous, excessive and mutual. According to different modes, the charging and discharging rules of energy storage and the transmission direction of mutual power are designed, and the specific switching strategy is given. Then, the power quality of critical load (CL) is considered at the load side, and the backstepping control is applied to keep the expected trajectory of CL voltage stable for the power spring. Aiming at the problem of blocked information network communication, a distributed consistency model predictive compensation control method is proposed. Finally, the effectiveness and accuracy of the proposed control strategy are verified on the Matlab/Simulink simulation platform.

**Keywords:** park microgrid; autonomy-mutual aid; power interaction; backstepping control; predictive compensation control; resilience control

## 0 引言

在“双碳”的背景下, 传统配电系统正逐步向多微电网 (MMG) 结构过渡<sup>[1]</sup>, 作为能源生产和基础服

务的重要载体, 园区微电网的物理边界和管理权清晰, 是典型的园区级物理信息系统 (park-level physical cyber system, PPCS), 因此如何保障园区系统的高效

收稿日期: 2024-11-19; 录用日期: 2025-03-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62173074, 52477075); 新能源电力系统全国重点实验室开放课题项目 (LAPS24015).

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: liuxinrui@ise.neu.edu.cn.

优质运行是本文的关注点.

在分布式能源集成方面: 文献 [2] 从储能角度出发, 探讨了分布式储能的时空分布机制, 但是能源形式单一, 缺少与其他形式能源的协调互补. 文献 [3] 提出考虑需求侧响应, 并建立光伏出力不确定性模型和电价激励型需求侧响应模型, 但只考虑光伏最大并网容量问题, 并未讨论并网后电能质量的问题. 在电能质量提升方面: 文献 [4-5] 针对电力弹簧从不同工况分别讨论了稳压情况. 在系统弹性提升方面: 以失负荷最小为目标提升系统弹性, 文献 [6] 分析了智能算法在考虑多目标含分布式电源配电网故障恢复中的应用, 文献 [7] 在抵御网络物理攻击时利用网络拓扑优化提升系统的弹性.

综上所述, 分布式能源在配电网/微电网中充分发挥了可再生能源与储能系统协调互补优势, 但现有研究对光伏、风机、储能等分布式能源的利用情况差异较大且控制目标单一. 因此本文针对多园区系统考虑多个关键控制目标, 凸显园区级微电网电能质量保障方法的重要意义, 主要贡献如下:

1) 提出考虑自治-互济的多园区端网弹性协调控制策略, 保证孤岛下园区系统电能质量. 针对微电网间功率交互问题, 以子微网净功率和功率互济时最大传输功率作为约束条件, 提出自治、过渡、互济3种运行模式, 保证MMG高效、优质运行.

2) 考虑重要负荷用电质量和满意度问题, 在负荷端将带有指令滤波的反步控制应用到电力弹簧中, 解决传统控制方法难以保持重要负荷电压期望轨迹稳定跟踪的问题, 并利用Lyapunov稳定性方法验证

系统稳定性.

3) 针对信息网络中点对点通信阻塞问题, 提出基于一致性算法的无模型预测补偿控制方法, 解决因通信受阻导致的功率数据缺失问题.

## 1 PPCS 的架构

典型的园区微电网系统如图1所示, 由物理层、信息层和应用层构成. 园区微电网内的所有实体单元均包含电力电子变换器、传感器及控制器, 通过公共耦合点连接到配电网<sup>[8]</sup>.

## 2 面向多微网园区分布式协作控制

### 2.1 MOC 通信架构

假设系统包含  $M$  个园区微网 MMG, 微电网间通信网络对应  $M$  个有向图  $\mathcal{G}_1, \dots, \mathcal{G}_M$ . 第  $k$  个 MG 系统用有向图  $\mathcal{G}_k = (V_k, E_k, A_k)$  来描述其互联拓扑连接关系, 其中非空节点集  $V_k = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$  表示 MG 代理集合;  $E_k \subset V \times V$  表示通信链路;  $A_k = \{a_{ij}^k\}_{n \times n}$  表示网络连接矩阵,  $a_{ij}^k$  表示通信权重. 若  $a_{ij}^k \neq 0$ , 则表示节点  $i$  向节点  $j$  传递信息; 反之, 则  $a_{ij}^k = 0$ . 度矩阵  $D_k = \text{diag}\{d_{11}, d_{22}, \dots, d_{nn}\}$  表示 MG 各节点连接的边的数量, 拉普拉斯矩阵为  $L_k = D_k - A_k$ . 微网内的通信网络参考微网间的通信网络进行定义.

### 2.2 多园区微网内控制策略

定义  $k$ -th 园区微网有  $N_k$  个 DG,  $k = 1, 2, \dots, M$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, N_k$ , 其中  $i \neq j$ . 控制目标是使  $k$ -th 园区微网每个 DGs 的频率和电压恢复到参考值,  $\omega_{k,\text{ref}}, v_{k,\text{ref}}$ , DGs 间有功/无功功率按容量共享. 有

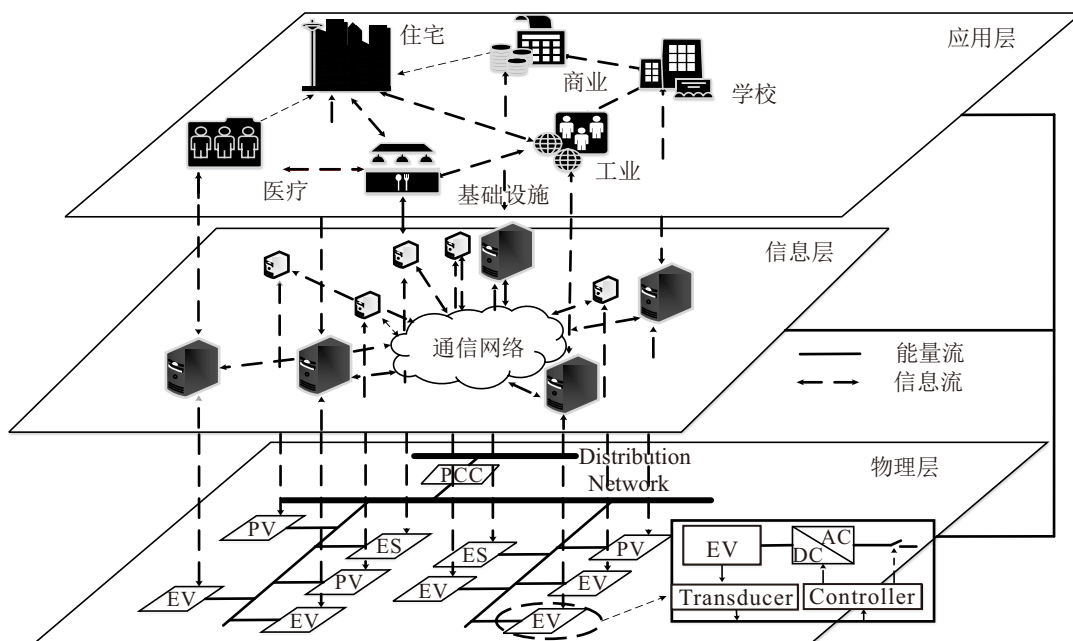


图1 PPCS 架构

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |\omega_{k,i}(t) - \omega_{k,\text{ref}}| &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |v_{k,i}(t) - v_{k,\text{ref}}| &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |P_{k,i}(t)/P_{k,i}^{\max} - P_{k,j}(t)/P_{k,j}^{\max}| &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |Q_{k,i}(t)/Q_{k,i}^{\max} - Q_{k,j}(t)/Q_{k,j}^{\max}| &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

1) 微网内的电压/频率调节.

为了获得精确的无功功率共享, 本文取所有电压的加权平均值, 因此电压观测器设置如下:

$$\hat{v}_{k,i}(t) = v_{k,i}(t) + \int_{t_0}^t \sum_{j \in N_k} a_{ij}^k [\hat{v}_{k,j}(s) - \hat{v}_{k,i}(s)] ds, \quad (2)$$

其中  $\hat{v}_{k,i}(t)$  为电压  $v_{k,i}(t)$  的估计值.

频率/电压控制器可以设计为

$$\begin{cases} \tau \dot{\omega}_{k,i} = \sum_{j \in N_k} a_{ij}^k [\omega_{k,j} - \omega_{k,i}] + [\omega_{k,\text{ref}} - \omega_{k,i}], \\ \tau \dot{\hat{v}}_{k,i} = \sum_{j \in N_k} a_{ij}^k [\hat{v}_{k,j} - \hat{v}_{k,i}] + [\hat{v}_{k,\text{ref}} - \hat{v}_{k,i}], \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\tau$  为时间常数, 代表控制的响应速度.

2) DGs之间的有功/无功功率共享.

MG 内所有 DG 的功率输出均应按其额定功率的比例实现功率共享, 即

$$\alpha_{k,i} = \alpha_{k,j}, \quad \beta_{k,i} = \beta_{k,j}. \quad (4)$$

其中:  $\alpha_{k,i}(t) = P_{k,i}(t)/P_{k,i}^{\max}$ ,  $\beta_{k,i}(t) = Q_{k,i}(t)/Q_{k,i}^{\max}$ . 静态下垂系数  $K_{k,i}^P$  和  $K_{k,i}^Q$  一般根据有功/无功功率额定值  $P_{k,i}^{\max}$  和  $Q_{k,i}^{\max}$  来选择, 以满足

$$K_{k,j}^P P_{k,i} = K_{k,i}^P P_{k,j}, \quad K_{k,j}^Q Q_{k,i} = K_{k,i}^Q Q_{k,j}. \quad (5)$$

功率控制器设计如下:

$$\begin{cases} \tau \dot{P}_{k,i} = \sum_{j \in N_k} a_{ij}^k [K_{k,j}^P P_{k,i} - K_{k,i}^P P_{k,j}] / K_{k,i}^P + \\ \quad [K_{k,\text{ref}}^P P_{k,\text{ref}} - K_{k,i}^P P_{k,i}] / K_{k,i}^P, \\ \tau \dot{Q}_{k,i} = \sum_{j \in N_k} a_{ij}^k [K_{k,j}^Q Q_{k,i} - K_{k,i}^Q Q_{k,j}] / K_{k,i}^Q + \\ \quad [K_{k,\text{ref}}^Q Q_{k,\text{ref}} - K_{k,i}^Q Q_{k,i}] / K_{k,i}^Q, \end{cases} \quad (6)$$

其中  $i \neq j$ . 当系统进入稳态运行时,  $K_{k,i}^P P_{k,i} \rightarrow K_{k,\text{ref}}^P P_{k,\text{ref}}$ ,  $K_{k,i}^Q Q_{k,i} \rightarrow K_{k,\text{ref}}^Q Q_{k,\text{ref}}$ .

在满足微网内控制目标的同时, 需要兼顾系统的经济运行. 本文主要考虑有功功率的成本,  $k$ -th 园区微网中第  $i$  个 DG 的发电单元的发电成本函数表示为

$$C_i(P_i) = c_i + b_i P_i + a_i P_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, N_k. \quad (7)$$

其中:  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  为成本系数,  $P_i$  为第  $i$  个 DG 的输出功率.

DG <sub>$i$</sub>  的增量成本率如下:

$$\lambda_i = \frac{\partial C_i(P_i)}{\partial P_i} = b_i + 2a_i P_i. \quad (8)$$

若微网内所有 DGs 的增量成本一致, 则微网的总发电成本最小.

各分布式发电单元按照式 (8) 等微增量成本原则输出功率, 考虑在 DG 不超出容量约束情况下, DG 控制器设计如下:

$$\begin{cases} P_{k,i}^{\text{ref}} = \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} \lambda_{k,j} - 2b_i \right) / (4a_i), \\ f_{k,i} = f_{\text{MG}}^{\text{ref}} - m_{k,i} (P_{k,i} - P_{k,i}^{\text{ref}}). \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $\lambda_{k,j}$  为第  $k$  个 MG 微网中第  $j$  个 DG 增量成本率,  $f_{\text{MG}}^{\text{ref}}$  为第  $k$  个 MG 微网的参考频率,  $m_{k,i}$  为 DG <sub>$k,i$</sub>  下垂系数. 选择增量成本信息作为一致性变量, DG <sub>$k,i$</sub>  本地控制器通过通信网络接收到邻居 DG <sub>$k,j$</sub>  的增量成本信息, 并根据式 (9) 更新参考功率, 可以满足经济运行要求并完成频率恢复目标.

### 2.3 多园区微网间控制策略

微网间旨在调节不同园区微电网间功率传输, 构建常态化不确定扰动情况下园区级“个体自治-群体互济”的弹性自治方法, 提升多园区微网系统在不同运行工况下的综合能效和经济性.

对于微网间的功率分配原则是在下垂控制的基础上设计而来, 通过测量各微网 PCC 点处的功率, 达到 PCC 点功率控制的目的, 控制方程设计如下:

$$f_k = f_{\text{ref}} - m_k (P_k - P_k^{\text{ref}}) + \gamma_k. \quad (10)$$

其中:  $f_{\text{ref}}$  为第  $k$  个园区微网的参考频率,  $m_k$  为下垂系数,  $\gamma_k$  为调节变量. 有

$$m_k = \frac{\omega_{\text{ref}} - \omega_{\min}}{P_k^{\max} - P_k^{\text{ref}}}. \quad (11)$$

调节变量  $\gamma_k$  根据一致性算法更新如下:

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_k = & -c_{P_k} \left[ \sum_{l \in \mathfrak{R}_k} A_k \left( \sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i} / \left( \sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i} \right)^{\max} - \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_{i=1}^{N_k} P_{l,i} / \left( \sum_{i=1}^{N_k} P_{l,i} \right)^{\max} \right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

其中:  $c_{P_k}$  和  $c_{\omega_k}$  为正值的控制增益,  $\mathfrak{R}_k$  为 MG <sub>$k$</sub>  的邻近节点集合. 通过调整式 (12) 可实现 MG 的有功功率按照最大容量分配.

系统频率标么化可以表示为

$$f_k' = \frac{f_k - \vartheta(f_{k,\max} + f_{k,\min})}{\vartheta(f_{k,\max} - f_{k,\min})}. \quad (13)$$

其中  $f_k = f_{k,\max} + ((f_{k,\min} - f_{k,\max})/P_k^{\max})P_k$  为系统频率, 本文设定  $\vartheta = 0.5$ .

当  $f'_1 = f'_2 = \dots = f'_k$  时, 有

$$\frac{P_{1,1} + \dots + P_{1,N_1}}{P_{1,1}^{\max} + \dots + P_{1,N_1}^{\max}} = \frac{P_{k,1} + \dots + P_{k,N_k}}{P_{k,1}^{\max} + \dots + P_{k,N_k}^{\max}}. \quad (14)$$

2.4 园区微网运行模式切换策略

定义  $k$ -th MG 不含储能净功率  $\Delta P_{k,s} = \sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i} - P_k^{\text{load}}$ ,  $k$ -th MG 含储能净功率  $\Delta \tilde{P}_{k,s} = \Delta P_{k,s} + \partial_{k,t} \left| \sum P_{\text{ES},k} \right| + \xi_{k,t} \left| \sum P_{\text{EV},k} \right|$ ,  $0 \leq \xi_{k,t}$ ,  $\partial_{k,t} \leq 1$  分别为微网中投入 EV 和 ES 的比例系数. 式中  $P_k^{\text{load}}$  和  $P_{k,i}^{\max}$  分别为  $k$ -th 个园区微电网总负荷功率和第  $i$  个 DG 最大有功输出. 同时为保证储能单元的正常工模式, SOC 超过 95% 禁充, SOC 低于 5% 禁放, 储能的模式标志位如表 1 所示.

1) MG 个体自治模式.

① 若  $\Delta P_{k,s} = 0$ , 则完全自治;

表1 储能模式标志位

SOC( $t-1$ )/%	工作模式	$f_{\text{SOC}(t-1)}$
5 ~ 20	不放电	0
20 ~ 80	放电	-1
	充电	1
80 ~ 95	不充电	2

② 若  $\Delta P_{k,s} \neq 0$ , 则如表 2 所示.

$$\sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i} + \partial_{k,t} \left| \sum P_{\text{ES},k} \right| + \xi_{k,t} \left| \sum P_{\text{EV},k} \right| = P_k^{\text{load}}, \quad 0 \leq \partial_{k,t}, \xi_{k,t} \leq 1. \quad (15)$$

若  $P_{k,i} < P_{k,i}^{\max}$ , 以发电成本最小为优化目标, DG 发电成本如式 (7) 所示. 若  $P_{k,i} = P_{k,i}^{\max}$ , 以供电可靠性为目标, DG 发电成本不再满足式 (7), 通过考虑系统源荷供需平衡, 设计多模式切换控制策略.

表2  $\Delta P_{k,s} \neq 0$  的运行模式

$\Delta P_{k,s} > 0$	$\Delta P_{k,s} < 0$
<p>(I) if <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{ES}}} = 0/1</math>, <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{EV}}} = 2</math>;                      if <math>\sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i}^{\max} - \partial_{k,t} \sum P_{\text{ES},k} = P_k^{\text{load}}</math>;                      then: 自治模式, 储能充电;                      else: 互济模式,  <math>\Delta \tilde{P}_{k,s} = \Delta P_{k,s} - \partial_{k,t} \sum P_{\text{ES},k}</math>;</p>	<p>(I) if <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{ES}}} = -1/2</math>;                      if <math> \Delta P_{k,s}  \leq \sum P_{\text{ES},k}</math>;  <math>\sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i}^{\max} + \partial_{k,t} \sum P_{\text{ES},k} = P_k^{\text{load}}</math>;                      then: 自治模式;                      else: 互济模式,  <math>\Delta \tilde{P}_{k,s} = \Delta P_{k,s} + \partial_{k,t} \sum P_{\text{ES},k}</math>;</p>
<p>(II) if <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{ES}}} = 2</math>, <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{EV}}} = 0/1</math>;                      if <math>\sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i}^{\max} - \xi_{k,t} \sum P_{\text{EV},k} = P_k^{\text{load}}</math>;                      then: 自治模式, 电动汽车充电;                      else: 互济模式,  <math>\Delta \tilde{P}_{k,s} = \Delta P_{k,s} - \xi_{k,t} \sum P_{\text{EV},k}</math>;</p>	<p>(II) if <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{ES}}} = 0</math>, <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{EV}}} = -1/2</math>;                      if <math> \Delta P_{k,s}  \leq \sum P_{\text{EV},k}</math>;  <math>\sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i}^{\max} + \xi_{k,t} \sum P_{\text{EV},k} = P_k^{\text{load}}</math>;                      then: 自治模式;                      else: 互济模式,  <math>\Delta \tilde{P}_{k,s} = \Delta P_{k,s} + \xi_{k,t} \sum P_{\text{EV},k}</math>;</p>
<p>(III) if <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{ES}}} = 0/1</math>, <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{EV}}} = 0/1</math>;                      if <math>\sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i}^{\max} - \sum P_{\text{ES},k} - \xi_{k,t} \sum P_{\text{EV},k} = P_k^{\text{load}}</math>;                      then: 自治模式, 储能、电动汽车充电;                      else: 互济模式,  <math>\Delta \tilde{P}_{k,s} = \Delta P_{k,s} - \sum P_{\text{ES},k} - \xi_{k,t} \sum P_{\text{EV},k}</math>;</p>	<p>(III) if <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{ES}}} = -1/2</math>, <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{EV}}} = -1/2</math>;                      if <math> \Delta P_{k,s}  \geq \sum P_{\text{ES},k}</math>;  <math> \Delta P_{k,s}  \leq \sum P_{\text{ES},k} + \sum P_{\text{EV},k}</math>;                      then: 自治模式,  <math>\sum_{i=1}^{N_k} P_{k,i}^{\max} + \sum P_{\text{ES},k} + \xi_{k,t} \sum P_{\text{EV},k} = P_k^{\text{load}}</math>;                      else: 互济模式, <math>\Delta \tilde{P}_{k,s} = \Delta P_{k,s} + \sum P_{\text{ES},k} + \xi_{k,t} \sum P_{\text{EV},k}</math>;</p>
<p>(IV) if <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{ES}}} = 2</math>, <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{EV}}} = 2</math>;                      then: 储能和电动汽车不充电,                      互济模式, <math>\Delta \tilde{P}_{k,s} = \Delta P_{k,s}</math>;</p>	<p>(IV) if <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{ES}}} = 0</math>, <math>f_{\text{SOC}_{k,(t-1)}^{\text{EV}}} = 0</math>;                      then: 储能和电动汽车不放电,                      互济模式, <math>\Delta \tilde{P}_{k,s} = \Delta P_{k,s}</math>;</p>

2) 自治-互济过渡模式.

为保证园区微网在进行群体互济时能够留有一定的功率裕度来应对自身园区内的负荷突变,制定群体互助动态阈值条件 $|\Delta\check{P}_{k,s}| \geq P_{SET}$ .考虑电动汽车移动储能的容量及时序性,动态阈值条件的设定不考虑 $P_{EV,k}$ .

3) MG 群体互济模式.

以 $\Delta P_{k,s} < 0$ 为例,若存在 $\Delta P_{k',s} > 0, k \neq k'$ ,则MG群首先进入负荷互济模式,有 $\Delta\check{P}_s = \left| \sum \Delta\check{P}_{k',s} \right| - \left| \sum \Delta\check{P}_{k,s} \right| = 0$ .如果 $\Delta\check{P}_s > 0$ 且 $f_{SOC_{k,(t-1)}^{EV}} \neq 2$ 或 $f_{SOC_{k',(t-1)}^{ES}} \neq 2$ ,则进入储能充电互济模式,平衡方程为

$$\begin{aligned} \Delta\check{P}_s &= \sum_{f_{SOC} \neq 2} \partial_{f_{SOC} \neq 2}^{k,t} P_{ES}^{k,t} + \sum_{f_{SOC} \neq 2} \xi_{f_{SOC} \neq 2}^{k,t} P_{EV}^{k,t}, \\ 0 &\leq \partial_{f_{SOC} \neq 2}^{k,t}, \xi_{f_{SOC} \neq 2}^{k,t} \leq 1. \end{aligned} \quad (16)$$

如果 $\Delta\check{P}_s < 0$ ,且 $f_{SOC_{k',(t-1)}^{EV}} \neq 0$ 或 $f_{SOC_{k',(t-1)}^{ES}} \neq 0$ ,则进入储能放电互济模式,平衡方程为

$$\begin{aligned} \Delta\check{P}_s &= \sum_{f_{SOC} \neq 0} \partial_{f_{SOC} \neq 0}^{k',t} P_{ES}^{k',t} + \sum_{f_{SOC} \neq 0} \xi_{f_{SOC} \neq 0}^{k',t} P_{EV}^{k',t}, \\ 0 &\leq \partial_{f_{SOC} \neq 0}^{k',t}, \xi_{f_{SOC} \neq 0}^{k',t} \leq 1. \end{aligned} \quad (17)$$

在多微网互济模式下,为减少能量大规模流动带来的损失,微网采取就近原则互济;在进入储能放电互济模式下,当 $|\Delta\check{P}_s|$ 过大时,优先让储能充电倍率较大的参与放电工作,以保证系统的稳定性,其次考虑参与放电工作储能的经济成本.

3 面向负荷端电能质量弹性提升

考虑用户侧对电能质量要求越来越高,本文在负荷端根据电力弹簧模型利用反步法设计控制器,将其与需要高电能质量的负载串联,图2为控制器结构.

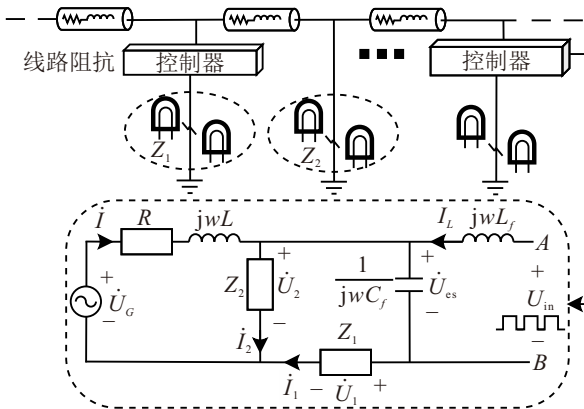


图2 电力弹簧控制器结构

电力弹簧状态方程为

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{U_{es}}{L_f} + \frac{U_{in}}{L_f}, \quad (18)$$

$$\frac{dU_{es}}{dt} = \frac{I_L}{C_f} + \frac{U_{es}}{C_f(Z_1 + Z_2)} + \frac{Z_2 I}{C_f(Z_1 + Z_2)}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= \\ &= -\frac{Z_2 U_{es}}{L(Z_1 + Z_2)} + \frac{U_G}{L} - \frac{(RZ_1 + Z_1 Z_2 + RZ_2) I}{L(Z_1 + Z_2)}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$U_1 = -\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{es} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} I. \quad (21)$$

其中: $U_G$ 为园区微网中的母线电压, $R + jwL$ 为线路阻抗, $Z_1$ 和 $Z_2$ 分别为CL和非重要负荷(non-critical load, NCL), $I$ 为园区微网注入电流, $C_f$ 和 $L_f$ 分别为滤波电容和电感, $U_{es}$ 为输出电压.

由逆变器原理可知, $U_{in} = U_{dc} m^d$ ,其中 $m^d$ 为控制率.因此式(18)可以改写为如下形式:

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{U_{es}}{L_f} + \frac{U_{dc} m^d}{L_f}. \quad (22)$$

定义CL电压和电压参考值 $U_{1,ref}$ ,误差量为 $e_1 = U_1 - U_{1,ref}$ ,求导得 $\dot{e}_1 = \dot{U}_1 - \dot{U}_{1,ref}$ .

定义Lyapunov函数

$$V_1 = e_1^2/2. \quad (23)$$

同时引入虚拟控制器参数 $k_1$ ,对式(23)求导得

$$\frac{dV_1}{dt} = -k_1 e_1^2 + e_1 \left( k_1 e_1 + \frac{dU_1}{dt} - \frac{dU_{1,ref}}{dt} \right). \quad (24)$$

若使系统稳定,需满足 $dV_1/dt \leq 0$ ,因此令条件式 $k_1 e_1 + dU_1/dt - dU_{1,ref}/dt = 0$ 即可.

对式(21)求导得

$$\frac{dU_1}{dt} = -\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \times \frac{dU_{es}}{dt} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \times \frac{dI}{dt}. \quad (25)$$

将式(19)、(20)和(25)代入条件式得到虚拟控制器输出电流 $I_L$ 为

$$\begin{aligned} I_L &= \\ &= \frac{(Z_1 + Z_2) C_f}{Z_1} \left( k_1 e_1 - \frac{dU_{1,ref}}{dt} \right) + \frac{Z_2 C_f}{L} U_G - \\ &\left[ \frac{Z_2^2 C_f}{L(Z_1 + Z_2)} + \frac{1}{Z_1 + Z_2} \right] U_{es} - \\ &\left[ \frac{(RZ_1 + Z_1 Z_2 + RZ_2) Z_2 C_f}{L(Z_1 + Z_2)} + \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right] I. \end{aligned} \quad (26)$$

由于输出电流在计算时会出现“微分膨胀问题”,将输出电流 $I_L$ 经指令滤波器输出电流 $I_L^c$ 和电流微分 $dI_L^c/dt$  [9].

定义电流输出误差为 $e_2 = I_L - I_L^c$ ,求导得 $\dot{e}_2 = \dot{I}_L - \dot{I}_L^c$ .

从全局考虑更新式(23)Lyapunov函数形式

$$V_2 = e_1^2/2 + e_2^2/2. \quad (27)$$

对式(27)Lyapunov函数求得

$$\dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2. \quad (28)$$

将式(22)、(24)代入(28),并引入参数 $k_2$ 得

$$\frac{dV_2}{dt} = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_2 \left[ \frac{U_{dc} m^d}{L_f} - \frac{U_{es}}{L_f} - \frac{dI_L^c}{dt} + k_2 e_2 \right]. \quad (29)$$

若使系统稳定,则需满足 $dV_2/dt \leq 0$ ,因此令 $U_{dc} m^d/L_f - U_{es}/L_f - dI_L^c/dt + k_2 e_2 = 0$ 即可,得到控制率 $m^d$ 为

$$m^d = \frac{L_f}{U_{dc}} \left[ -k_2 e_2 + \frac{1}{L_f} U_{es} + \frac{dI_L^c}{dt} \right]. \quad (30)$$

### 4 信息层通信受限下模型预测补偿控制

针对分布式控制园区微电网系统发生点对点通信受阻问题,以 $t$ 时刻 $DG_i$ 和 $DG_j$ 的通信链路受阻为例,第 $j$ -th DG不能准确地获得功率 $P_i(t)$ ,本文选择无模型预测补偿控制<sup>[10]</sup>预测 $t$ 时刻 $\hat{P}_{A_i}(t)$ ,有

$$\hat{P}_{A_i}(t) = \theta_i(t) P_i(t) + (1 - \theta_i(t)) P_{C_i}(t) + d(t). \quad (31)$$

其中: $P_{C_i}$ 为无模型预测获得的预测补偿功率, $d(t)$

为系统干扰.

令 $\Delta \tilde{P}_{k,s}$ 为 $\Delta u(t)$ ,设计 $P_{C_i}$ 为

$$P_{C_i}(t) = P_{A_i}(t-1) + \hat{\beta}(t-1) \Delta u(t-1). \quad (32)$$

其中 $\hat{\beta}(t-1)$ 为待设计参数, $\hat{\beta}(t-1) \leq c$ , $c$ 为常数,且有

$$\hat{\beta}(t-1) = \hat{\beta}(t-2) + \frac{v \Delta u(t-2) (P_{C_i}(t-1) - \Delta \hat{\beta}(t-2) \Delta u(t-2))}{\mu + \Delta u^2(t-2)}, \quad (33)$$

$$\Delta u(t-1) = \frac{\rho \hat{\beta}(t-1)}{\varpi + \hat{\beta}^2(t-1)} (P_i(t) - P_{C_i}(t-1)). \quad (34)$$

这里参数 $\rho$ 、 $v$ 、 $\varpi$ 和 $\mu$ 分别取值为0.4、0.1、0.3和0.4, $\hat{\beta}(1) = 0.7$ .综上所述,有

$$P_{C_i} = \frac{P_{A_i}(t-1) + \rho \hat{\beta}^2(t-1) P_i(t) / (\varpi + \hat{\beta}^2(t-1))}{1 + \rho \hat{\beta}(t-1) / (\varpi + \hat{\beta}^2(t-1))}. \quad (35)$$

本文弹性控制如图3所示.

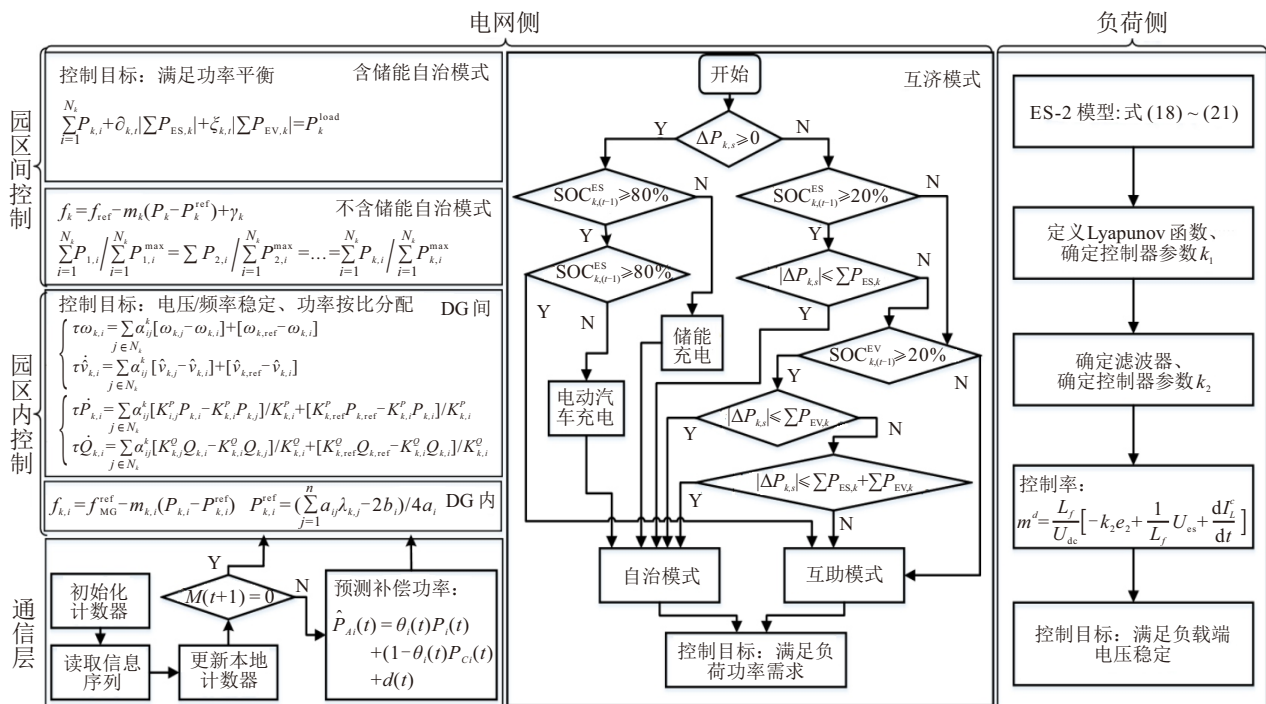


图3 多园区系统协同弹性控制

## 5 仿真分析

### 5.1 场景 1: 不同耗电特性园区间功率互济

设置居民园区、商业园区和工业园区的负荷分别为40 MW、40 MW和30 MW.在 $t = 6 \sim 8$  s时,居民园区的负荷增加至45 MW, $t = 8$  s时恢复至初值.

$t = 9 \sim 14$  s时,商业园区的负荷增加10 MW. $t = 18 \sim 22$  s时,工业园区的用电需求增加至85 MW.

图4所示为不同园区间功率自治-互济结果.在 $t = 0 \sim 8.65$  s时工业园区满足本地自治模式下,与其他园区进行了功率互济.在 $t = 9 \sim 10.6$  s时,各园

区的新能源出力情况不能满足阈值条件,此时各园区无互济,园区保持独立运行,PCC功率值为0。 $t = 10.6$  s时,工业园区和商业园区满足互济条件,此时工业园区为商业园区输送10.98 MW功率。

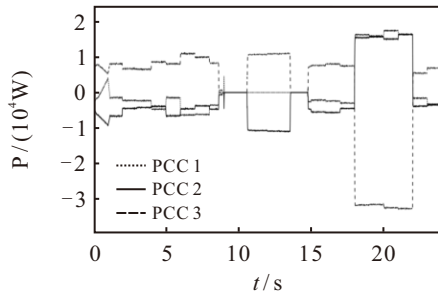


图4 园区间功率自治-互济结果

### 5.2 场景 2: 单一园区负荷端电能质量提升

设园区母线电压峰值初值为311 V,在 $t = 5$  s时下降至300 V,  $CL = 50 \Omega$ ,  $NCL = 100 \Omega$ . 系统正常运行时,由于线路阻抗的影响,负荷端电压有效值为219.2 V. 在 $t = 6$  s时加入本文所提控制策略,CL端电压值稳定跟踪至219.95 V. 而未加入控制策略的NCL电压下降至212.3 V. 加入控制器的CL电压波动率(voltage fluctuation rate, VFR)提升约0.023%. 图5所示集中式控制策略,在 $t = 5$  s母线电压波动时,负荷侧电压“抖动”剧烈,即使在 $t = 6$  s时将母线电压恢复至额定值,负荷侧电压也不能保持电压期望轨迹稳定跟踪,在响应速度上远不及分布式控制. 对比文献[11]和文献[12],本文所提出控制方法在响应速度、控制精度、THD、二/三次谐波上均有较大优势. 控制结果如表3所示.

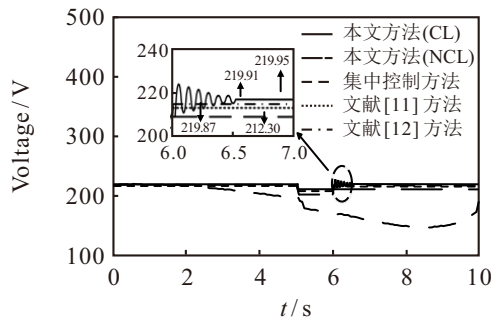


图5 负载电压有效值

表3 电能质量提升结果 %

参数	VFR	THD	H2	H3	
控制前	3.5	—	—	—	
文献[11]	0.043	7.07	24.19	14.02	
控制后	文献[12]	0.058	4.28	2.97	1.49
本文	<b>0.023</b>	<b>4.05</b>	<b>0</b>	<b>3.98</b>	

### 5.3 场景 3: 通信受阻下用电保供

以 DG 通信受阻为例,在 $t = 2 \sim 6$  s 时园区 DG<sub>7</sub>

到 DG<sub>8</sub> 通信链路受阻,在 $t = 4 \sim 6$  s 内加入控制策略,设 $a_i = 0.2$ . 系统状态如图6所示.

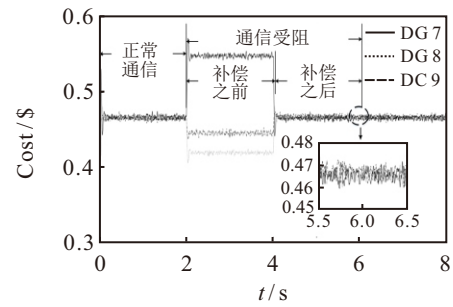


图6 通信受阻时系统状态

由图6可知,当通信受阻影响较小时,对发生通信受阻 DG 的影响较大,增量成本曲线发生超调,偏离系统的一致值,但是系统的频率依然保持在系统标称频率 50 Hz,电压波形畸变率仅为 0.07%. 可见在通信受阻极端情况下,预测补偿控制可抑制各 DG 超调量并完成增量成本一致性控制过程,实现了园区系统的二次控制,保障了负荷端电能质量.

## 6 结论

本文所提出的分布式协同控制策略增加了系统的灵活性,功率互济可以满足负荷的需求,同时阈值条件的设定减少了各区间的不必要的功率损耗. 在母线电压波动为 3.53% 的情况下,能够保证重要负荷电压波动仅为 0.023%,电压畸变率为 4.05%,电能质量有大幅提升. 模型预测补偿控制使得各 DG 增量成本一致,系统稳定运行.

### 参考文献 (References)

- [1] Cai S, Xie Y Y, Zhang M L, et al. A stochastic sequential service restoration model for distribution systems considering microgrid interconnection[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 15(3): 2396-2409.
- [2] 刘鑫蕊, 孟庆坤, 侯敏, 等. 基于移动储能时空优化调度的配电网韧性提升策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3375-3384.  
(Liu X R, Meng Q K, Hou M, et al. Distribution network resilience improvement strategy based on time-space optimal scheduling of mobile energy storage[J]. Control and Decision, 2024, 39(10): 3375-3384.)
- [3] 杨志淳, 杨帆, 闵怀东, 等. 考虑需求响应的交直流混合配电网分布式光伏承载能力鲁棒评估方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 83-92.  
(Yang Z C, Yang F, Min H D, et al. Distributed PV hosting capacity robust assessment of AC/DC hybrid distribution network considering demand response[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 83-92.)
- [4] 刘闯, 陈皓楠, 韩子娇, 等. 用于分布式电压调控的 AC-AC 型主动电力弹簧[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 737-746.

- (Liu C, Chen H N, Han Z J, et al. AC-AC based active electric spring (AC-AES) for distributed voltage regulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(2): 737-746.)
- [5] 薛花, 凌晨, 张晓雯, 等. 通信网络非理想情形交流微电网多电力弹簧电压平稳控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(21): 8244-8260.  
(Xue H, Ling C, Zhang X W, et al. Voltage regulation control method of multiple electric springs in AC microgrid with non-ideal communication network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(21): 8244-8260.)
- [6] 杨珺, 孔文康, 孙秋野. 智能算法在含分布式电源配电网故障恢复的应用综述[J]. *控制与决策*, 2019, 34(9): 1809-1818.  
(Yang J, Kong W K, Sun Q Y. Application of intelligent algorithms to service restoration of distribution network with distributed generations[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(9): 1809-1818.)
- [7] Liu Z X, Wang L F. Leveraging network topology optimization to strengthen power grid resilience against cyber-physical attacks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(2): 1552-1564.
- [8] 王睿, 孙秋野, 张化光, 等. 基于信-能复合调制的多母线直流微电网电流边缘控制策略[J]. *控制与决策*, 2023, 38(10): 2783-2794.  
(Wang R, Sun Q Y, Zhang H G, et al. Current edge-control strategy of multi-bus DC microgrids based on information-energy dual modulation[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(10): 2783-2794.)
- [9] Xu D, Tang L, Jiang B, et al. Cooperative adaptive command filtered backstepping control for EVs to UPS-microgrid via virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, 54(9): 5369-5380.
- [10] Brahmia I, Wang J C, Oliveira L, et al. Hierarchical smart energy management strategy based on cooperative distributed economic model predictive control for multi-microgrid systems[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31(2): e12732.
- [11] 葛路明, 汤涌, 朱凌志, 等. 弱电网下逆变器的虚拟节点电压反馈控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(21): 8392-8405.  
(Ge L M, Tang Y, Zhu L Z, et al. Virtual node voltage feedback control scheme for inverter in weak grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(21): 8392-8405.)
- [12] Wang Q S, Cheng M, Chen Z, et al. Steady-state analysis of electric springs with a novel  $\delta$  control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(12): 7159-7169.

### 作者简介

刘鑫蕊 (1981-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为交直流微电网控制、配电网故障分析及自愈控制、综合能源系统优化, E-mail: liuxinrui@ise.neu.edu.cn;

李新宇 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为交直流微电网控制, E-mail: 3052130270@qq.com;

郭亮亮 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为微电网储能系统状态估计和均衡控制策略研究, E-mail: gl305401@163.com;

王睿 (1993-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为交直流微电网控制, E-mail: wangrui@ise.neu.edu.cn;

王冰玉 (1992-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为储能控制及其在电力系统中的应用、电力系统致稳控制, E-mail: wangbingyu@ncepu.edu.cn;

孙秋野 (1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为能源互联网的建模与优化运行、新能源并网运行、电力电子化的电力系统、多智能体协调控制、人工智能及其在能源系统中的应用, E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn.