

文章编号: 2095-4980(2025)07-0663-08

抗超高频噪声扰动的直流微电网协同控制方法

郭祥富¹, 张凯², 胡誉蓉¹, 贺翔¹, 赵健¹, 刘昊^{*1}

(1. 国网河南省电力公司 电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 随着高频斩波调制技术的应用, 直流微电网中超高频噪声干扰愈发严重, 极端情况下已影响到系统的稳定运行。为提升系统抗干扰能力和动态运行性能, 本文提出一种面向含储能系统的直流微电网分层协同抗扰控制方法。设计了一种非平滑复合调节法则, 通过采用前馈补偿缓解不断增加的超高频噪声扰动; 基于低通信成本的非平滑动态平均共识协议, 建立了一种动态下垂策略, 旨在为荷电状态均衡进行动态功率分配; 利用动态功率分配策略和每个储能单元的一次控制, 确保荷电状态动态平衡和系统级母线电压的稳定性。通过硬件仿真验证, 相较于常规策略, 所提策略具备更强的抗干扰能力, 可用于多种储能支撑微电网系统的稳定性。

关键词: 直流微电网; 协同控制; 超高频噪声扰动; 低通信成本

中图分类号: TM711; TN702

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024550

Coordination control method for DC microgrids against ultra-high frequency noise disturbances

GUO Xiangfu¹, ZHANG Kai², HU Yurong¹, HE Xiang¹, ZHAO Jian¹, LIU Hao^{*1}

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou Henan 450052, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou Henan 450052, China)

Abstract: With the application of high-frequency chopping modulation technology, the ultra-high frequency noise interference in DC microgrids has become increasingly severe, and in extreme cases, it has already affected the stable operation of the system. To enhance the system's anti-interference capability and dynamic operation performance, a hierarchical collaborative anti-disturbance control method is proposed for DC microgrids with energy storage systems. A non-smooth composite control law is designed to mitigate the increasing ultra-high frequency noise disturbances through feedforward compensation. Based on a non-smooth dynamic average consensus protocol with low communication cost, a dynamic droop strategy is established to dynamically allocate power for State-of-Charge (SoC) balancing. The dynamic power allocation strategy and the primary control of each energy storage unit are utilized to ensure the dynamic balance of the SoC and the stability of the system-level bus voltage. Hardware-in-the-loop simulation results show that, compared with conventional strategies, the proposed strategy has stronger anti-interference capability and can be used for the stability of various energy storage supported microgrid systems.

Keywords: DC microgrids; cooperative control; ultra-high-frequency noise disturbances; low communication costs

直流微电网因其能有效整合直流特性的可再生能源和直流负载而备受关注。考虑到可再生能源的间歇性,

收稿日期: 2024-10-03; 修回日期: 2024-10-29

基金项目: 国家电网河南省电力公司科技资助项目(52170223000T)

*通信作者: 刘昊 email: liuhaoepri@139.com

引用格式: 郭祥富, 张凯, 胡誉蓉, 等. 抗超高频噪声扰动的直流微电网协同控制方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(7): 663-670. DOI: 10.11805/TKYDA2024550.

Citation format: GUO Xiangfu, ZHANG Kai, HU Yurong, et al. Coordination control method for DC microgrids against ultra-high frequency noise disturbances[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(7): 663-670. DOI: 10.11805/TKYDA2024550.

在直流微电网中设置电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)对于维持系统稳定运行至关重要^[1]。BESS 能效成本敏感性高,因而采取高频斩波调制技术提升转换效率。随着 BESS 并网转换器斩波频率增加,引入了多倍率超高频噪声,增加了系统的波动性与复杂性,需考虑包括直流母线电压调节和稳定功率分配在内的多个控制目标^[2]。

近年来,为提升直流微电网的抗噪声稳定性,开展了一系列先进的非线性控制方法研究,其中包括基于物理系统的参数估计^[3]、模型预测控制^[4]以及结合人工智能技术的数据驱动控制策略^[5]。这些研究不仅关注储能系统的内部协同,还考虑了不同输出特性的协调。在直流微电网中, BESS 对于抑制可再生能源的间歇性影响,增强系统稳定性具有关键作用。但现有研究往往忽视了 BESS 内部的荷电状态(State of Charge, SoC)不均衡问题及其可能导致的严重后果。BESS 响应速率有限,超高频噪声下 SOC 的不一致可能导致经济和安全问题,甚至引发严重的事故^[6]。为解决这些问题,研究者们提出了多种控制策略,包括直接控制、动态功率分配和多智能体分布式策略^[7]。这些策略通过预设的参考信息和自适应调节机制,旨在实现 SOC 的均衡和系统的稳定运行。在实际的自治直流微电网系统中,系统的全局稳定性取决于 BESS 的动态功率分配和负载侧的系统稳定性。单一目标的研究在整个直流微电网系统中并不够全面,多个控制目标应同时进行相对研究。基于上述讨论,新的稳定性障碍已出现。具体地说,全局一致性通信过程会导致提供给初级控制器的参考信息迟滞^[8]。通过动态功率分配实现 SOC 均衡也与母线电压稳定性密切相关^[9]。因此,基于 BESS 的自治微电网的长期稳定运行已成为具有多时间尺度和多系统层次的耦合多目标任务^[10]。基于整体考虑,文献中仅进行了少量研究。这些研究仍将电源视为分布式发电单元而非实际 BESS^[11],无法保证全局系统层次的抗超高频噪声母线电压稳定性。

本文提出了一种面向直流微电网抗超高频噪声的非平滑协调控制策略。该策略通过前馈补偿和复合控制设计,精确调节母线电压,并通过自适应动态下垂调节实现储能单元(Energy Storage Unit, ESU)的 SoC 均衡。所提出的控制策略在不同时间尺度上实现了协调,保证了系统在源侧和负载侧未知超高频扰动下的快速性能恢复能力。通过仿真验证了所提控制策略的有效性,为直流微电网的稳定运行提供了新的解决方案。

1 问题描述

1.1 系统描述

考虑一个典型的多源自主直流微电网,其单母线如图 1 所示。该系统独立运行,仅依靠可再生能源发电。由于负载和可再生能源的不稳定性,多个储能单元(ESU)并联到直流母线上,通过充电或放电维持母线电压稳定。BESS 提供输出功率,忽略电阻负载,对系统稳定性的影响较小。

本文仅讨论放电模式,也可轻松扩展到充电模式。多个转换器分别受控以应对负载变化,实现稳定的母线电压。电池视为 ESU,通过双向直流-直流(DC-DC)转换器连接到直流母线。为进行理论分析,将负载分为电阻负载和功率负载。然后将系统简化为 n 个升压降压 DC-DC 转换器连接至总线,如图 1 所示。此外,多代理控制器通过相互通信获取近似的全局信息,从而进行动态功率分配。第 i 个转换器的平均模型为:

$$L_i \dot{i}_{Li} = E_i - (1 - d_i)v_{Ci}, C_i \dot{v}_{Ci} = (1 - d_i)i_{Li} - P_i/v_{Ci} \quad (1)$$

式中: L_i 、 C_i 分别为第 i 个转换器的续流电感和高压侧电容; $P_i = P_{CPL} - P_{CPS}$ 为第 i 个 ESU 的输出功率, P_{CPL} 、 P_{CPS} 分别为集总功率源和功率负载对应的功率; E_i 、 i_{Li} 、 \dot{i}_{Li} 、 v_{Ci} 、 \dot{v}_{Ci} 分别为源侧电压、电感电流及其导数、电容电压及其导数; d_i 为转换器的控制信号,具体反映在开关管的占空比上。

新选定状态 $x_{i,1} = 0.5L_i i_{Li}^2 + 0.5C_i v_{Ci}^2$, $x_{i,2} = E_i i_{Li}$, 系统可重写为:

$$\dot{x}_{i,1} = x_{i,2} + \vartheta_{i,1}, \dot{x}_{i,2} = u_i + \vartheta_{i,2} \quad (2)$$

式中: $\vartheta_{i,1}$ 、 $\vartheta_{i,2}$ 分别为各控制通道未知扰动, $\vartheta_{i,1} = -P_i$; u_i 为待设计的控制输入, $u_i = E_i^2/L_i - (1 - d_i)E_i v_{Ci}/L_i$; $\vartheta_{i,2}$ 可视为对系统稳定性的影响集总项,包括超高频扰动、未模拟动态和系统内部不确定性。

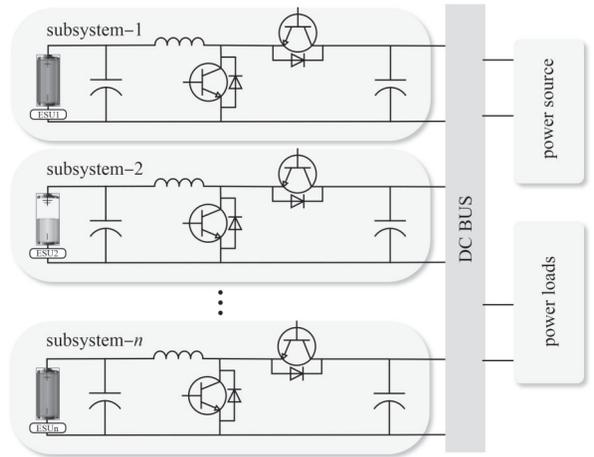


Fig.1 Simplified DC microgrid model
图1 简化直流微电网模型

1.2 控制目标

当存在超高频噪声时, 应特别考虑母线电压的负阻抗特性的稳定性。此外, 还应对多个 ESU 进行功率分配, 保持系统稳定性。此外, 用于动态功率分配的下垂控制是通过自我信息和多代理共识计算得出的。因此, 在多代理达成共识之前, 功率分配的下垂系数是不准确的, 会导致不恰当的功率分配。多代理的通信时间会削弱协议达成前的系统稳定性。因此, 应设计近似全局信息的估计策略, 确保 SoC 平衡和多代理共识的可操控时间。

1.3 图论与通信拓扑

将通信网络表示为一个图 $G=(V,E,A)$, 其中所有转换器被描述为一个聚合体 V , 通信边表示为 $E \subseteq V \times V$, $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 反映了单元的邻接性。 a_{ij} 为集合 A 的元素, $a_{ij}=1$ 表示 $(v_j, v_i) \in E$; $a_{ij}=0$ 表示 $(v_j, v_i) \notin E$ 。转换器间的通信图是强连接和权重平衡的, 在所有转换器都连接到网络后, 通过双工通信就能轻松实现这一要求。

2 抗扰协同控制器设计

2.1 主控制器设计

根据前文描述, 主控制器的控制目标是设计控制信号 u_i 以确保状态 $x_{i,1}$ 可跟踪参考值 $x_{i,1,r}=0.5L_i(\mathcal{G}_{i,1}/E_i)^2+0.5C_i v_{Ci,r}^2$ 。其中, $\mathcal{G}_{i,1}$ 为 i^{th} 变流器的功率要求, 该值波动较大, 会导致跟踪偏差, 削弱控制器的性能, 甚至削弱电网系统的稳定性。观测器本质为积分微分器耦合运算, 具备滑动平均与均值估计性能。因此, 设计一种高阶滑模观测器(High-Order Sliding Mode Observer, HOSMO)有效评估偏差 $\mathcal{G}_{i,1}$ 、 $\mathcal{G}_{i,2}$, 以实现快速响应和精确跟踪。观测器设计如下^[12]:

$$\begin{cases} \dot{z}_{i,1,0} = x_{i,2} + h_{i,1,0} \\ \dot{z}_{i,1,j} = h_{i,1,j}, j = 1, 2, 3 \\ h_{i,1,0} = -k_{i,1,0} l_{i,1}^{1/4} \text{sig}^{3/4}(z_{i,1,0} - x_{i,1}) + z_{i,1,1} \\ h_{i,1,1} = -k_{i,1,1} l_{i,1}^{1/3} \text{sig}^{2/3}(z_{i,1,1} - h_{i,1,0}) + z_{i,1,2} \\ h_{i,1,2} = -k_{i,1,2} l_{i,1}^{1/2} \text{sig}^{1/2}(z_{i,1,2} - h_{i,1,1}) + z_{i,1,3} \\ h_{i,1,3} = -k_{i,1,3} l_{i,1} \text{sig}^0(z_{i,1,3} - h_{i,1,2}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_{i,2,0} = u_i + h_{i,2,0} \\ \dot{z}_{i,2,k} = h_{i,2,k}, k = 1, 2 \\ h_{i,2,0} = -k_{i,2,0} l_{i,2}^{1/3} \text{sig}^{2/3}(z_{i,2,0} - x_{i,1}) + z_{i,2,1} \\ h_{i,2,1} = -k_{i,2,1} l_{i,2}^{1/2} \text{sig}^{1/2}(z_{i,2,1} - h_{i,2,0}) + z_{i,2,2} \\ h_{i,2,2} = -k_{i,2,2} l_{i,2} \text{sig}^0(z_{i,2,2} - h_{i,2,1}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\text{sig}^a(x) = \text{sign}(x)|x|^a$; $k_{i,1,0}$ 、 $k_{i,1,1}$ 、 $k_{i,1,2}$ 、 $k_{i,1,3}$ 、 $k_{i,2,0}$ 、 $k_{i,2,1}$ 、 $k_{i,2,2}$ 为待设计的观测器参数; $l_{i,1} > 0$ 、 $l_{i,2} > 0$ 为观测器增益; $z_{i,1,0}$ 、 $z_{i,1,1}$ 、 $z_{i,1,2}$ 、 $z_{i,1,3}$ 、 $z_{i,2,0}$ 、 $z_{i,2,1}$ 、 $z_{i,2,2}$ 分别为 $x_{i,1}$ 、 $\mathcal{G}_{i,1}$ 、 $\dot{\mathcal{G}}_{i,1}$ 、 $\ddot{\mathcal{G}}_{i,1}$ 、 $x_{i,2}$ 、 $\mathcal{G}_{i,2}$ 、 $\dot{\mathcal{G}}_{i,2}$ 的观测值; $h_{i,1,j}$ 、 $h_{i,2,k}$ 为中间状态; $\dot{z}_{i,1,0}$ 、 $\dot{z}_{i,1,j}$ 、 $\dot{z}_{i,2,0}$ 、 $\dot{z}_{i,2,k}$ 分别为 $z_{i,1,0}$ 、 $z_{i,1,j}$ 、 $z_{i,2,0}$ 、 $z_{i,2,k}$ 对时间的导数。在有限的时间内, 观察者的轨迹值与目标值的比值为 T_{stO} 。

然后, 将观测器的结果引入系统, $x_{i,2,r}$ 、 $x_{i,3,r}$ 为 $x_{i,2}$ 、 u_i 的参考值。参考状态为 $x_{i,1,r}=0.5L_i z_{i,1,1}^2/E_i^2+0.5C_i v_{Ci,r}^2$, $x_{i,2,r}=\dot{x}_{i,1,r}-z_{i,1,2}$, $x_{i,3,r}=\dot{x}_{i,2,r}-z_{i,2,1}$ 。按式(5)设计主控制器:

$$v_i = -k_1 \text{sig}(e_{i,1})^{1+2a} - k_2 \text{sig}(e_{i,2})^{(1+2a)/(1+a)} \quad (5)$$

式中: $e_{i,1} = x_{i,1} - x_{i,1,r}$; $e_{i,2} = (x_{i,2} - x_{i,2,r})/\ell$ 为状态偏差, $\ell > 1$ 为控制器增益; $k_{i,1}$ 、 $k_{i,2}$ 为赫尔维茨多项式 $h_c(s) = s^2 + k_{i,2}s + k_{i,1}$ 的系数。

2.2 次级控制器设计

除初级层的分散稳定外, 另一个问题是通过 SoC 平衡在相对较大的时间尺度上动态分配功率, 优化系统稳定性。对于功率输出的分配, 基本的下垂控制器可表示为 $v_{Ci,r} = V^* - m_i P_i$ 。其中, V^* 为标称参考电压值, m_i 为下垂系数。当所有变流器并联在一条直流母线上时, 功率输出分配为 $P_1:P_2:\dots:P_n = m_1^{-1}:m_2^{-1}:\dots:m_n^{-1}$ 。为应对 BESS 的波动, 进行动态电力分配, 电池储能系统支撑平抑波动和动态功率分配都能以较低的通信成本和对总线电压较小的干扰实现。多代理一致性可达到近似的全局平均水平。本文以实现 2 个控制层之间的自律协调为目标, 设计了

一种非光滑共识方案, 其形式为:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_i = -\eta \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j)^{1+\beta} - \gamma \psi_i, i=1, 2, \dots, N \\ \hat{\theta}_i = \psi_i + \theta_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ_i 为第 i 个储能单元的可用容量, 充电模式下, $\theta_i = \overline{\text{SoC}} - \text{SoC}_i(t)$; 放电模式下, $\theta_i = \text{SoC}_i(t) - \underline{\text{SoC}}$ 。 $\text{SoC}_i(t)$ 为第 i 个 BESU 的实时 SoC 值, $\overline{\text{SoC}}$ 为保护 ESU 免受过度充电的最大 SoC 值, $\underline{\text{SoC}}$ 为保护 ESU 免受过度放电的最小 SoC 值, SoC 平衡应高于此值; $\hat{\theta}_i$ 为第 i 个代理对全局平均值的估计值; ψ_i 和 $\dot{\psi}_i$ 分别为中间变量及其导数; η 和 γ 为正的控制参数; $\beta \in (-1, 0)$ 为抗扰收敛速度因子。将两级控制器分层组合在一起, 提出的控制器如图 2 所示。主控制器旨在调节母线电压, 提高系统在超高频扰动下的稳定性; 次级控制器为每个 ESU 计算实时动态下垂系数, 确保 BESS 的 SoC 平衡。

2.3 稳定性证明

1) 母线电压稳定性分析

误差动态系统可描述为 $\dot{e}_i = \ell q_i + \varepsilon_i$, 其中 $e_i = [e_{i,1}, e_{i,2}]^T$, $q_i = [q_{i,1}, q_{i,2}]^T$, $q_{i,1} = e_{i,2}$, $q_{i,2} = -k_1 \text{sig}(e_{i,1})^{1+2\alpha} - k_2 \text{sig}(e_{i,2})^{(1+2\alpha)/(1+\alpha)}$, $\varepsilon_i = [\varepsilon_{i,1}, \varepsilon_{i,2}]^T$ 为观测器的跟踪误差。构建一个 Lyapunov 函数 $V_i(e_i) = \Gamma_i^T P_i \Gamma_i$, P_i 为一个正定对称矩阵, 服从 $B_i P_i + P_i^T B_i = -I$ 且 $B_i = [0, 1; -k_{i,1}, -k_{i,2}]$, $\Gamma_i = [\text{sig}(e_{i,1})^{1-\alpha/2}, \text{sig}(e_{i,2})^{(1-\alpha/2)/(1+\alpha)}]^T$ 。 V_i 的导数计算如下:

$$\begin{cases} \dot{V}_i = \ell_i \left(\frac{\partial V_i}{\partial e_{i,1}} q_{i,1} + \frac{\partial V_i}{\partial e_{i,2}} q_{i,2} \right) + \frac{\partial V_i}{\partial e_{i,1}} \varepsilon_{i,1} + \frac{\partial V_i}{\partial e_{i,2}} \varepsilon_{i,2} \\ \frac{\partial V_i}{\partial e_{i,1}} q_{i,1} + \frac{\partial V_i}{\partial e_{i,2}} q_{i,2} \leq -c_i V_i^{2/(2-\alpha)}, \quad \frac{\partial V_i}{\partial e_{i,1}} \varepsilon_{i,1} + \frac{\partial V_i}{\partial e_{i,2}} \varepsilon_{i,2} \leq V_i^{2/(2-\alpha)} + D_i^*, \quad \forall t \in [0, T_{1st0}] \end{cases} \quad (7)$$

式中: c_i 为正常数且满足: $c_i \geq 0.5(1-\alpha)$; D_i^* 为正常数且满足: $D_i^* \geq 0.5(1+\alpha)|\varepsilon_{i,1}|^{2/(1+\alpha)} + 0.5(1+2\alpha)|\varepsilon_{i,2}|^{2/(1+2\alpha)}$ 。

取正常数 c , 有下列方程成立:

$$\begin{cases} \dot{V}_i \leq -(\ell c - 1)V_i^{2/(2-\alpha)} + D_i^*, t \in [0, T_{1st0}] \\ \dot{V}_i \leq -\ell c V_i^{2/(2-\alpha)}, t \in [T_{1st0}, +\infty) \end{cases} \quad (8)$$

可以得出结论, 在 $[T_{1st}, \infty)$ 中, 所有系统状态都是均匀有界的, 在 $[T_{1st}, \infty)$ 中, \dot{V} 将是负定的。因此, 直流母线电压的稳定性是有保证的。

2) 平均共识分析

受文献[13]的启发, 设定 $r_i = \hat{\theta}_i - \theta_{\text{avg}}$, $r_{ij} = r_i - r_j$, 基于无拉普拉斯矩阵结构, 计算出 Lyapunov 函数为: $W = 1/(2+\beta) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(r_{ij})^{1+\beta}$ 。则 W 的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(r_{ij})^{1+\beta} \{-\gamma(r_{ij}) + \Xi_{ij} - \eta \sum_{k=1}^N (a_{ik} \text{sig}(r_{ik})^{1+\beta} - a_{jk} \text{sig}(r_{jk})^{1+\beta})\} = \\ &= -2\eta \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(r_{ij})^{1+\beta} \right)^2 - \gamma \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} (r_{ij}) \text{sig}(r_{ij})^{1+\beta} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(r_{ij})^{1+\beta} [\Xi_{ij}] \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\Xi_i = (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{\text{avg}}) + \gamma(\theta_i - \theta_{\text{avg}})$, $\dot{\theta}_i$, $\dot{\theta}_{\text{avg}}$ 分别为 θ_i , θ_{avg} 对时间的一阶导数; $\Xi_{ij} = \Xi_i - \Xi_j$ 。

很明显, $-\gamma \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} (r_{ij}) \text{sig}(r_{ij})^{1+\beta} < 0$, $-2\eta \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} (r_{ij}) \text{sig}(r_{ij})^{1+\beta} \right)^2 < 0$ 可被视为边界常数, $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(r_{ij})^{1+\beta} [\Xi_{ij}]$ 可被

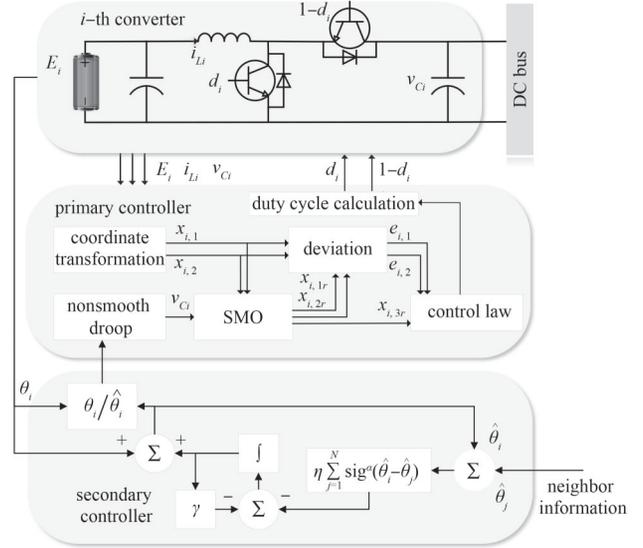


Fig. 2 Sketch diagram of the proposed coordination controller

图 2 拟议的协调控制器示意图

视为正的有界常数。当具有足够大的 γ 和足够小的正 η , $\hat{\theta}_i$ 将趋向于 θ_{avg} 。

3) SoC 均衡分析:

令 $A_i = P_{\text{avg}} m_{\text{avg}} / (\phi \hat{\theta}_i^2)$, 其中 $P_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N P_i / N$, $m_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N m_i / N$, 即 $\dot{\theta}_i = -|A_i| \theta_i^2$ 。然后令 $z_i = \theta_i - \theta_j$, $Q = 0.5z_i^2$, 可得

$$\dot{Q} = (\theta_i - \theta_j) (|A_j| \theta_j^2 - |A_i| \theta_i^2) \quad (10)$$

又因为 $0 < \theta_i < 1$, $0 < \theta_j < 1$, A_i 和 A_j 近似相等, 因此可得 $\dot{Q} \leq 0$, 且 SoC_i 、 SoC_j 将向全局平均值收敛。

令 $n_i = \phi(\hat{\theta}_i / \theta_i)$, $n_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N n_i / N$, $P'_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N P'_i / N$, 其中, P'_i 为下垂系数为 n_i 时的输出功率, 输出功率分配为 $\int P'_i dt$;
 $\int P'_i dt = \theta_i : \theta_j$ 。

考虑 $P'_i = n_{\text{avg}} P'_{\text{avg}} \theta_i / (\phi \hat{\theta}_i)$, $P_i = m_{\text{avg}} P_{\text{avg}} \theta_i^2 / (\phi \hat{\theta}_i)$ 。当 $\theta_i \leq \theta_{\text{avg}}$ 时, $\int P_i dt \leq \int P'_i dt$; 当 $\theta_i \geq \theta_{\text{avg}}$ 时, $\int P_i dt \geq \int P'_i dt$ 。很明显, SoC 均衡将在设定值 SoC 之前达到。

3 仿真实验验证

图 3 为一个具有代表性的带 BESS 的自主直流微电网仿真平台。4 个 DSP28379D 用于模拟分布式通信节点, OP5600 作为仿真环节, 实验结果由示波器采集。通信拓扑如图 4 所示。均衡目标设定为 60%, 储能单元 1~4 的初始 SoC 分别设定为 90%、80%、70%、85%; DC-DC 升压变换器常态母线电压为 100 V, 高、低压侧电容值均为 1 100 μF , 电感值为 1 mH; 电池标称电压为 48 V, 额定容量为 5 Ah, 充电限制电压为 54.6 V, 放电切断电压为 39 V, 最大放电倍率 2C(10 A)。采用改进的双闭环比例积分控制器(Proportional Integral, PI)作为对比验证策略, PI 控制器电压环比例、积分增益分别为 2.75、185; 电流环比例、积分增益分别为 0.5、45。所提策略参数中, 观测器 1 各观测增益分别为 12、9、5、1, 观测器 2 各观测增益 20、5、1, 观测器观测带宽均设定为 1×10^8 。总带宽增益 ℓ 为 1 000, 主控制器的各偏差系数 k_1 、 k_2 分别为 0.5、0.3, 下垂系数增益 ϕ 为 0.05, 主控制器的收敛协调率系数 α 为 -0.15, 邻居信息比例增益 η 为 15, 一致性信息比例增益 γ 为 1。次级控制器的收敛协调率系数 β 为 -0.3。

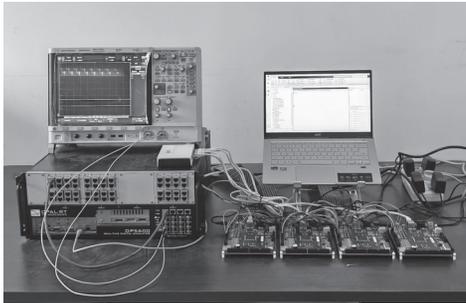


Fig.3 Schematic diagram of the simulation platform
图3 仿真平台示意图

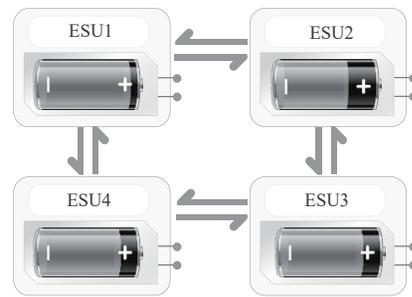


Fig.4 Communication network
图4 通信网络

即插即用测试的仿真结果如图 5 所示, 总负载功率设定为 400 W。在 0.3 s 时, ESU4 退出并停止放电; 0.7 s 时, ESU4 接入系统并恢复运行。负载变化下的母线电压及各单元输出功率如图 6 所示, 相较于传统双闭环控制策略, 所提控制策略具备更快的响应速度, 维持了更加稳定的母线电压与各个单元的输出功率, 因此, 所提策略具备更好的暂态和稳态性能。

储能系统充放电的动态功率分配验证仿真中, 充电目标设定为 90%, 放电目标设定为 60%, 充电功率设定为 1 000 W, 放电功率设定为 500 W。仿真结果动态功率分配与 SoC 均衡结果如图 7~8 所示, 4 个分布式节点对应的储能单元根据自身 SoC 状态实时调整运行功率, 并最终在预设目标达成 SoC 均衡。

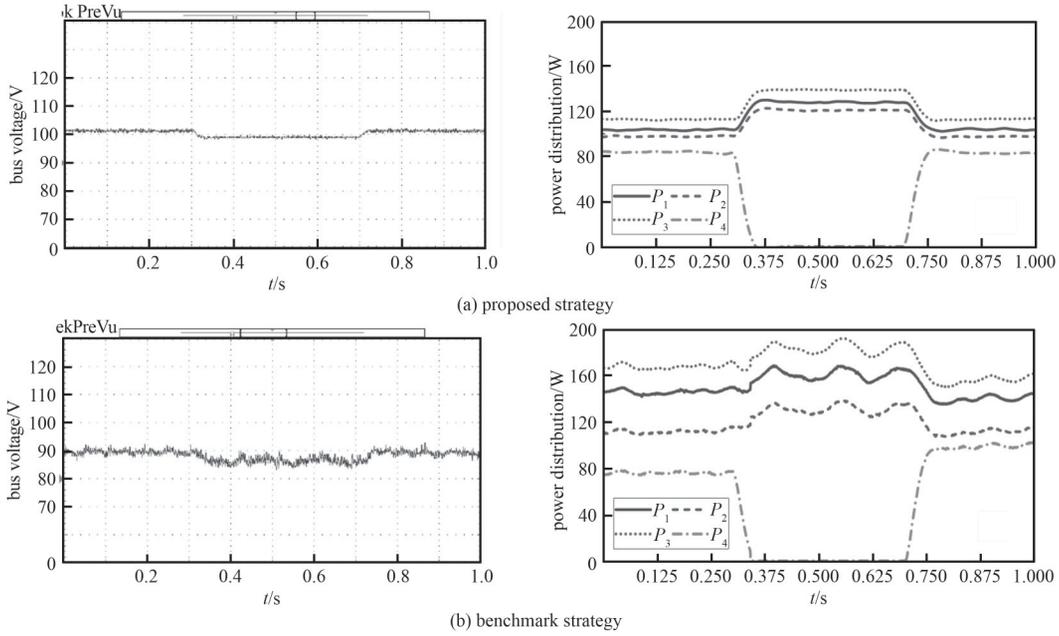


Fig.5 Simulation of the bus voltage and output power with ESU4 cut off at 0.3 s and plug in at 0.7 s
图 5 在 ESU4 于 0.3 s 关闭、0.7 s 接入的情况下,总线电压和输出功率的仿真对比结果

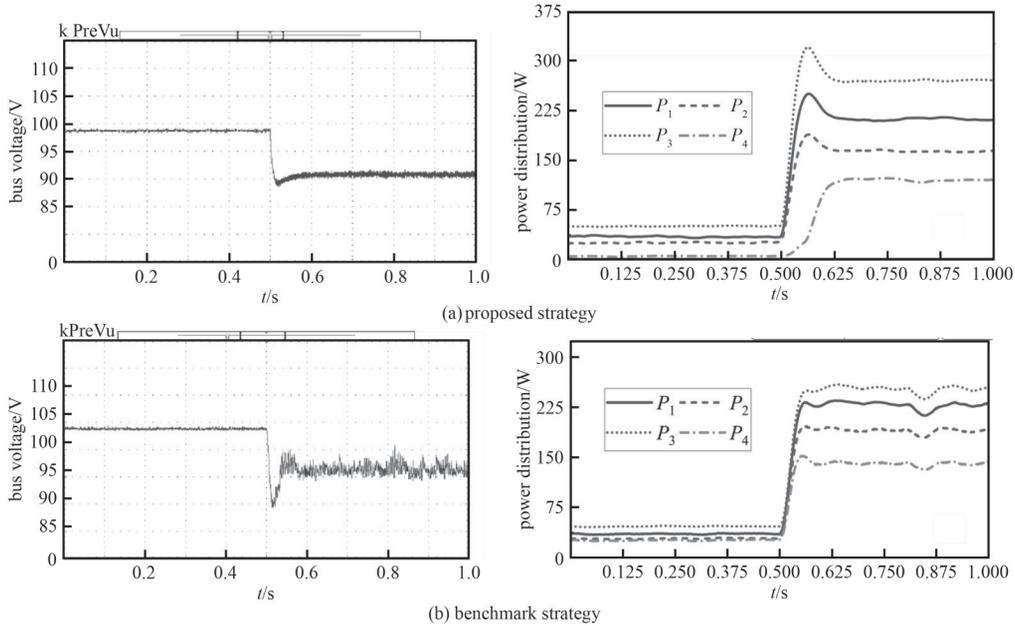


Fig.6 Simulation results of bus voltage and output power during load change
图 6 负载变化时,母线电压和输出功率的仿真结果

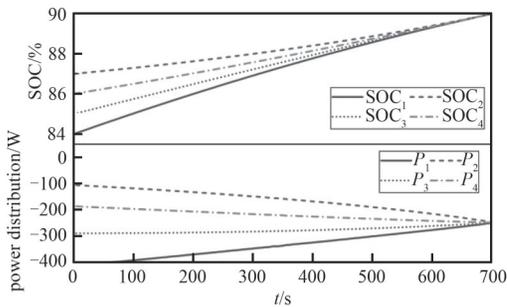


Fig.7 Dynamic balancing and power distribution in charging mode
图 7 充电模式下动态均衡及功率分配

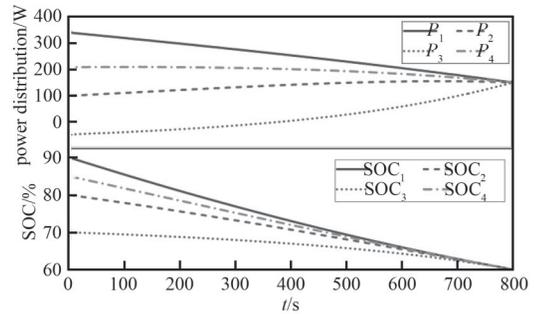


Fig.8 Dynamic balancing and power distribution in discharging mode
图 8 放电模式下功率分配及动态均衡

4 结论

通过采用前馈补偿和非平滑复合调节法则,有效缓解了超高频噪声扰动,提高了直流微电网的动态性能。动态下垂策略的引入实现了SoC的均衡,确保了系统的稳定性。本研究提出的控制方法不仅增强了直流微电网的抗扰动能力,还在应对现代通信技术带来的超高频噪声方面表现出色,显著提升了系统的可靠性和稳定性。相比传统的双闭环控制策略,所提方法在暂态响应速度和稳态性能方面均表现出优越性。仿真结果表明,所提策略在负载变化和ESU动态接入/退出情况下,能够保持更为稳定的母线电压和各单元的输出功率。所提非平滑协调控制策略通过多层次的动态调节,实现了对超高频噪声的有效抑制,并确保储能系统的SoC均衡和系统整体的稳定运行。仿真验证了方法的有效性,为直流微电网的抗扰动控制提供了一种新的解决方案。在实际应用中,系统的复杂性和多变量因素可能会影响控制策略的实施效果。未来工作将进一步优化控制算法,并在更大规模的直流微电网中进行验证,以提升策略的普适性和实用性。

参考文献:

- [1] 赵建军,刘佳林,李洋,等. 基于改进降噪自编码器的馈线终端失效率预测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024,22(5):537-542,557. (ZHAO Jianjun,LIU Jialin,LI Yang,et al. Failure rate prediction for feedback terminal units based on the improved stacked denoising autoencoder[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024,22(5):537-542,557.) DOI:10.11805/TKYDA2022124.
- [2] 孙秋野,于潇寒,王靖傲. "双高"配电系统的挑战与应对措施探讨[J]. 中国电机工程学报, 2024,44(18):7115-7135. (SUN Qiuye,YU Xiaohan,WANG Jing'ao. Discussion on challenges and countermeasures of "double high" power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024,44(18):7115-7135.) DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.240077.
- [3] 杨挺,杨风霞,叶芷杉,等. 基于动态采样压缩感知的超谐波监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2023,43(16):6278-6287. (YANG Ting,YANG Fengxia,YE Zhishan, et al. A new measurement method for supraharmonics based on dynamic sampling and compressed sensing[J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(16):6278-6287.) DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.221108.
- [4] ANDRÉS-MARTÍNEZ O,FLORES-TLACUAHUAC A,RUIZ-MARTINEZ O F,et al. Nonlinear model predictive stabilization of DC-DC boost converters with constant power loads[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021,9(1):822-830. DOI:10.1109/JESTPE.2020.2964674.
- [5] CUI Chenggang,YAN Nan,HUANGFU Baixiang,et al. Voltage regulation of DC-DC buck converters feeding CPLs via deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II—Express Briefs, 2022,69(3):1777-1781. DOI:10.1109/TCSII.2021.3107535.
- [6] JIN Yang,ZHAO Zhixing,MIAO Shan,et al. Explosion hazards study of grid-scale lithium-ion battery energy storage station[J]. Journal of Energy Storage, 2021(42):102987. DOI:10.1016/j.est.2021.102987.
- [7] ZIA M F, BENBOUZID M, ELBOUCHIKHI E, et al. Microgrid transactive energy: review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis[J]. IEEE Access, 2020(8):19410-19432. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2968402.
- [8] WU Xiaoyu,XU Yin,WU Xiangyu, et al. A two-layer distributed cooperative control method for islanded networked microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020,11(2):942-957. DOI:10.1109/TSG.2019.2928330.
- [9] NAHATA P,BELLA A L,SCATTOLINI R,et al. Hierarchical control in islanded DC microgrids with flexible structures[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021,29(6):2379-2392. DOI:10.1109/TCST.2020.3038495.
- [10] 杨挺,秦楠,李浩,等. 计及信息不确定性的多端交直流混合配电网分布式二级协同控制[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024,57(6):602-612. (YANG Ting,QIN Nan,LI Hao, et al. Distributed secondary cooperative control of multiterminal AC/DC hybrid distribution networks considering information uncertainty[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2024,57(6):602-612.) DOI:10.11784/tdxbz202304018.
- [11] NGUYEN D H,KHAZAEI J. Multiagent time-delayed fast consensus design for distributed battery energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018,9(3):1397-1406. DOI:10.1109/TSSTE.2017.2785311.
- [12] LEVANT A. Higher-order sliding modes,differentiation and output-feedback control[J]. International Journal of Control, 2003, 76(9/10):924-941. DOI:10.1080/0020717031000099029.
- [13] LI Shihua,WANG Xiangyu. Finite-time consensus and collision avoidance control algorithms for multiple AUVs[J]. Automatica, 2013,49(11):3359-3367. DOI:10.1016/j.automatica.2013.08.003

作者简介:

郭祥富(1983-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为配电物联网、电力信息化 .email:27667767@qq.com.

张 凯(1974-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为配电网标准化设计及概预算自动统计.

胡誉蓉(1997-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为谐波分析与治理.

贺 翔(1973-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为智能配电网.

赵 健(1988-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化.

刘 昊(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微电网控制.

勘 误:

2025 年 23 卷第 5 期, P501 原作者简介替换为:

王忠钰(1995-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力通信系统建设与运维 .email:1217968131@qq.com.

吕国远(1978-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统与信息系统管理.

李霜冰(1973-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统规划设计及建设运维.

韩雨阳(2000-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力接入网动态路由规划.

卢志鑫(1993-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为移动通信、电力线载波通信.

刘乙召(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力通信系统建设与运维.

岳顺民(1966-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电网企业数字化转型.