

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250553

基于线性二次最优控制的主动配电网储能分布式 多目标优化控制方法

刘琪¹, 王世友¹, 时慧喆², 陈贺³, 张丽泓¹, 王天资¹

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学工程实训中心, 山东 青岛 266590;
3. 煤科(北京)检测技术有限公司, 北京 102604)

摘要: 高渗透率分布式光伏接入配电网后易引发系统频繁过电压, 而传统集中优化调度方法因通信需求高、响应速度慢等问题, 难以满足电压实时调控需求。对此, 提出了基于线性二次最优控制的配电网储能分布式快速调压方法。首先, 为减少通信负担, 根据电气距离模块化指标进行配电网集群划分。其次, 建立以电压恢复和储能功率均衡为目标的主动配电网优化控制模型, 并设计基于新型观测器的分布式控制器, 通过优化选取观测器增益提升电压控制速度。最后, 选取 IEEE33 节点及 IEEE69 节点系统进行仿真。结果表明, 所提出的储能分布式优化控制方法在保证储能功率均衡的条件下, 有效消除节点电压越限, 提高配电网的电压水平。

关键词: 交流配电网; 集群划分; 分布式控制; 电压恢复; 线性二次最优控制

Distributed multi-objective optimal control method for energy storage in active distribution networks based on linear quadratic optimal control

LIU Qi¹, WANG Shiyu¹, SHI Huizhe², CHEN He³, ZHANG Lihong¹, WANG Tianzi¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. Engineering Training Center, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
3. Coal Science (Beijing) Test Technology Co., Ltd., Beijing 102604, China)

Abstract: The high penetration of distributed photovoltaic generation in distribution networks is prone to causing frequent overvoltage problems. However, traditional centralized optimal scheduling methods suffer from high communication requirements and slow response speeds, making it difficult to meet the demands of real-time voltage regulation. To address this issue, a distributed fast voltage regulation method for energy storage in distribution networks based on linear quadratic optimal control is proposed. First, to reduce communication burden, the distribution network is partitioned into clusters according to the electrical-distance-based modularity index. Second, an optimal control model for the active distribution network is established, with voltage recovery and energy storage power balance as the control objective. A distributed controller based on a novel observer is then designed, in which the observer gain is optimally selected to enhance the voltage control speed. Finally, simulations are conducted on the IEEE33-bus and IEEE69-bus systems. The results show that the proposed distributed optimal control method for energy storage can effectively eliminate node voltage violations while ensuring power balance among the energy storage units, thereby improving the voltage profile of the distribution network.

This work is supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 52307115).

Key words: AC distribution network; cluster partitioning; distributed control; voltage recovery; linear quadratic optimal control

0 引言

大力发展光伏、风电等可再生能源是减少碳排

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助 (52307115); 山东省自然科学基金青年科学基金项目资助 (ZR2023QE238)

放、贯彻“双碳”目标的重要途径^[1-3]。新能源大量接入配电网, 其波动性和间歇性造成配电网电压频繁波动, 易引发电压越限, 严重影响配电网的安全稳定运行^[4-7]。如何应对新能源发电的随机性, 快速有效调控配电网电压成为亟待解决的关键问题^[8-10]。

储能是配电网调压的关键设备^[11-13]。根据通信方式的不同, 已有的配电网储能电压调控策略主要有

集中式控制和分布式控制两种。其中,集中式电压调控方法可以利用全局信息实现有效的电压调整^[14-15]。文献[16]以节点电压偏差最小为目标,提出了一种基于储能的配电网集中式电压优化方法。文献[17]以最小化配电网运行成本为目标,提出了基于软开关和光伏逆变器的多时段电压集中式调控方法。集中式方法对全局电压的优化效果虽好,但通信要求高,难以做到实时控制,无法有效解决分布式光伏功率随机变化造成的电压频繁越限的问题^[18]。

与集中式控制相比,分布式控制取消了控制中心,只需相邻设备进行信息交互^[19-21]。鉴于分布式控制通信负担小、可靠性高的优点,已广泛应用于储能、光伏逆变器等设备的调控中。文献[22]提出了一种分布式多目标控制策略,通过原始-对偶次梯度算法来实现改善电压水平和提高运行经济性的目标。文献[23]提出了考虑光储协调的多阶段电压控制方法,对储能的有功功率和光伏逆变器无功功率进行多阶段分布式控制以解决电压越限问题。文献[24]提出了基于光伏逆变器无功补偿和光伏有功出力缩减的配电网电压协调控制策略,借助相邻光伏系统之间的通信,实现了配电网电压的分布式控制。

上述配电网分布式电压控制方法主要采用一致性算法,主要侧重于调压完成后的稳态优化效果,对分布式控制收敛性能的研究较少。为了提高分布式控制的收敛速度,优化控制方法被应用到分布式控制器设计中。文献[25]研究了交流微电网的电压控制,并提出了基于 H_{∞} 性能指标的分布式控制器。文献[26]以分布式电源的无功功率分配和电压恢复为目标,提出了微电网分布式二次电压控制器的优化设计方法。线性二次最优控制根据系统模型求解最优控制律,有效提高了控制速度。文献[27]提出了一种孤岛直流微电网的分布式二次优化控制方法,通过求解微电网系统对应的里卡提方程的解设计反馈增益,有效提高了控制速度。文献[28]建立了直流电解氢系统的小信号模型,并设计了基于线性二次型最优控制的全状态反馈控制器,有效提高了DC/DC变流器的动态特性。文献[29]提出了一种基于线性矩阵不等式的线性二次型最优控制方法,用于双有源桥变换器的闭环控制参数优化,增强了系统在负载扰动与电网波动下的动态性能。文献[30]采用线性二次最优控制设计DC/DC变流器的反馈控制器,能有效抑制电压电流波动。近年来,分布式最优控制理论取得了一些突破性进展。文献[31]提出了一种基于局部状态空间模型的线性二次最优控制方法,用于微电网的分布式频率控制。文献[32]

基于线性二次最优控制构建了一种孤岛微电网的分布式电压控制框架,并对通信结构与控制增益进行了优化设计。文献[33]利用线性二次最优控制理论,提出了基于观测器的直流微电网分布式控制器,能快速实现直流母线电压恢复和发电成本最小的目标。

由于交流配电网节点众多、光伏接入位置分散,传统的交流配电网分布式电压控制方法调压速度较慢。因此,提高交流配电网分布式电压控制方法的收敛性能,有利于实现快速有效的电压控制^[34-35]。本文以分布式储能为调压设备,提出了一种基于线性二次最优控制的配电网多目标分布式优化控制策略,具有通信负担低、稳定可靠、收敛速度快等优点。与现有工作相比,本文的主要贡献如下。

1) 针对分布式光伏高渗透率接入配电网后引起的节点电压越限问题,提出一种基于线性二次最优控制的分布式储能多目标优化控制策略,仅利用相邻集群划分区域的信息即可同时实现电压恢复和储能功率均衡的控制目标。

2) 基于线性潮流建立了配电网电压控制的动态模型,该模型维度低,简单实用,对不同拓扑结构的交流配电网具有普适性。

3) 通过线性二次型最优理论,设计分布式控制器,有效选取观测器增益,不仅能保证控制器的稳定性,还能提高分布式控制策略的收敛速度。

1 交流配电网集群划分

本文提出基于集群划分的分布式储能系统电压调控策略,如图1所示。针对配电网节点众多且电压越限区域集中的特点,通过构建电气高耦合度的电气集群,实现区域协同电压控制。各集群配置储能装置及本地控制器,通过集群间信息交互完成全局电压调控:本地控制器同步接收本集群与相邻集群电压信息,并向所在储能系统发送控制指令,有效降低通信网络复杂度并提升控制可靠性^[36-37]。

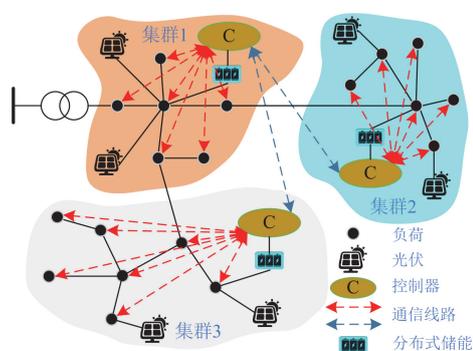


图1 基于集群划分的分布式控制框架

Fig. 1 Distributed control framework based on cluster division

1.1 交流配电网电压灵敏度模型

交流配电网的潮流模型可表示为^[38]

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功功率和无功功率; V_i 和 V_j 分别为节点 i, j 的电压; g_{ij} 为首端节点为 i 、末端节点为 j 的线路 l_{ij} 的电导; b_{ij} 为线路 l_{ij} 的电纳; θ_{ij} 为节点 i, j 的电压相角差; N 为系统总节点数。

对式(1)进行线性化, 可得有功功率和节点电压的关系^[39]为

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{J}_{\text{pv}} \Delta \mathbf{V} \quad (2)$$

式中: $\Delta \mathbf{P}$ 和 $\Delta \mathbf{V}$ 分别为节点注入有功功率变化量向量和节点电压幅值变化量向量; $\mathbf{J}_{\text{pv}} = \partial \mathbf{P} / \partial \mathbf{V}$ 为功率对电压的偏导。

根据式(2), 可得到 $\Delta \mathbf{V}$ 对 $\Delta \mathbf{P}$ 的灵敏度方程为

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{J}_{\text{pv}}^{-1} \Delta \mathbf{P} = \mathbf{S} \Delta \mathbf{P} \quad (3)$$

式中: \mathbf{S} 为 $\Delta \mathbf{V}$ 对 $\Delta \mathbf{P}$ 的灵敏度系数矩阵。

1.2 集群划分指标

本文采用基于电气距离的模块度指标进行配电网集群划分。该指标通过量化节点间电气耦合强度评估划分合理性, 数值越大表明集群结构越优。模块度值由网络拓扑连接度与电力系统的边权共同决定, 其数学表达式^[40]为

$$\rho = \frac{1}{2z} \sum_i \sum_j \left(e_{i,j} - \frac{k_i k_j}{2z} \right) \delta(i,j) \quad (4)$$

$$\delta(i,j) = \begin{cases} 1 & i, j \text{ 位于同一分区} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ρ 为系统模块度; z 为网络边权之和; $e_{i,j}$ 为连接节点 i, j 的边的权重; k_i 表示所有与节点 i 相连的边权之和。

电力系统的边权通常取决于电抗、空间距离等参数, 电气距离能更精确地表征节点间的电气耦合关系。采用节点电压灵敏度法进行电气距离计算, 其定义为

$$L_{i,j} = \sqrt{\sum_{n=1}^N \left[\lg \left(\frac{S_{n,n}}{S_{i,n}} \right) - \lg \left(\frac{S_{n,n}}{S_{j,n}} \right) \right]^2} \quad (6)$$

式中: $L_{i,j}$ 节点 i, j 之间的电气距离; $S_{n,n}$ 表示节点 n 功率变化对自身节点电压的灵敏度; $S_{i,n}$ 表示节点 n 功率变化对应节点 i 电压的灵敏度; $S_{j,n}$ 表示节点 n 功率变化对应节点 j 电压的灵敏度。

为量化节点间电气耦合强度, 基于电气距离构建集群划分权重指标, 其定义为

$$e_{i,j} = 1 - \frac{L_{i,j}}{\max(L)} \quad (7)$$

式中: L 表示电气距离。

以式(4)中的模块度值最大为目标, 采用文献[35]中的遗传算法进行集群划分。

2 储能分布式控制策略

2.1 目标函数

新能源出力波动易引发电网电压偏离, 而过度的储能充放调节将加速设备老化^[36-38]。对此, 构建电压恢复与储能功率均衡的双目标优化控制模型。同时, 在分布式控制架构下, 各储能系统仅与相邻集群进行有限信息交互, 获取本集群及相邻集群电压及储能负载率数据。

为了实现分布式通信下电压恢复和储能功率均衡的目标, 根据参考文献[26]中控制变量设计方法, 对第 m 个储能, 引入状态偏差参数 x_m , 如式(8)所示。

$$x_m = \alpha \sum_{n \in \Omega_{m,\text{node}}} (V_n - V_r) + \beta \sum_{q \in \Omega_{m,\text{ess}}} (L_m - L_q) \quad (8)$$

式中: $\Omega_{m,\text{node}}$ 表示第 m 个储能所在集群及与其通信连接的集群中的所有节点集合; $\Omega_{m,\text{ess}}$ 表示第 m 个储能所在集群及与其通信连接的集群中的所有储能集合; α 、 β 表示电压恢复、储能功率均衡目标函数的权重系数; L_m 、 L_q 分别表示第 m 个和第 q 个储能的负载率; V_n 表示节点 n 的电压; V_r 表示额定电压。

以图2所示配电网中储能3为例, 集合 $\Omega_{3,\text{node}}$ 包含集群2—集群4中的所有节点, 集合 $\Omega_{3,\text{ess}}$ 包含储能2—储能4。

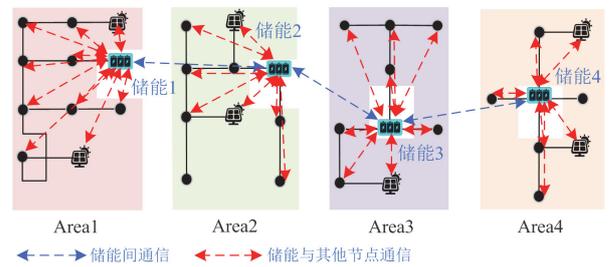


图2 分布式控制中的通信框架

Fig. 2 Communication framework in distributed control

第 m 个储能系统负载率可表示为

$$L_m = P_m P_{m,\text{max}}^{-1} \quad (9)$$

式中: P_m 为第 m 个储能的有功功率; $P_{m,\text{max}}$ 为第 m 个储能的最高充放电功率。

式(8)中等式右边第一项表示电压恢复的控制目标, 第二项表示储能系统功率均衡的控制目标, 通过储能系统的功率调节, 减小状态偏差参数 x_m , 可以实现电压恢复和储能功率均衡的目标。

2.2 电压和储能功率的动力学模型

根据式(3)中节点有功功率对电压的灵敏度, 当储能功率调整时, 第 m 个储能处的电压动态模型可表示为

$$V_m(k+1) = V_m(k) + \sum_{m=1}^M S_{i,m} \Delta P_m(k) \quad (10)$$

式中: $V_m(k+1)$ 为第 $k+1$ 次控制后第 m 个储能所在节点处的电压; $\Delta P_m(k)$ 为第 k 次控制过程中第 m 个储能节点的有功功率变化量; $S_{i,m}$ 为节点 i 处电压对第 m 个储能节点处有功功率的灵敏度系数; M 为储能的个数。

当储能功率调整时, 储能负载率动态模型为

$$L_m(k+1) = L_m(k) + P_{m,\max}^{-1} \Delta P_m(k) \quad (11)$$

式中: $L_m(k+1)$ 为第 $k+1$ 次控制过程中第 m 个储能的负载率。

根据电压和负载率的动态模型, 状态偏差参数 x_m 的动态模型可表示为

$$x_m(k+1) = x_m(k) + \alpha \sum_{n \in \Omega_{m,\text{node}}} \sum_{m=1}^M S_{n,m} \Delta P_m(k) + \beta \sum_{q \in \Omega_{m,\text{ess}}} \sum_{m=1}^M (P_{m,\max}^{-1} - P_{q,\max}^{-1}) \Delta P_m(k) \quad (12)$$

式中: $x_m(k+1)$ 为第 $k+1$ 次控制过程中第 m 个储能配置节点状态偏差参数; $S_{n,m}$ 为节点 n 对第 m 个储能节点处有功功率的电压灵敏度系数。

2.3 控制器设计

采用线性二次最优控制理论设计控制器, 根据线性二次最优控制的标准形式, 定义了成本函数 J 为

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\sum_{m=1}^M x_m^2(k) + \varepsilon \sum_{m=1}^M \Delta P_m^2(k) \right] \quad (13)$$

式中: ε 为控制成本的权重系数。

配电网中所有的储能进行电压控制的一般形式为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (14)$$

式中: $\mathbf{u}^T = [\Delta P_1 \quad \Delta P_2 \quad \cdots \quad \Delta P_M]$; \mathbf{A} 为 N 阶单位矩阵; $\mathbf{x}^T = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_M]$; \mathbf{B} 为系统输入矩阵。

为设计分布式控制器, 将电压控制的动态模型写为分布式形式, 如式(15)所示。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \sum_{m=1}^M \mathbf{B}_m \mathbf{u}_m(k) \quad (15)$$

式中: \mathbf{B}_m 为 \mathbf{B} 的第 m 列, $\mathbf{B}_m = [0 \ 0 \ \cdots \ 1 \ \cdots \ 0] \mathbf{B}$ 。

不同控制器之间的通信结构描述为

$$\mathbf{y}_m(k) = \mathbf{H}_m \mathbf{x}(k) \quad (16)$$

式中: \mathbf{y}_m 为第 m 个储能控制器的量测信息; \mathbf{H}_m 为由通信链路确定的关联矩阵 \mathbf{H} 的第 m 行, $\mathbf{H}_m = [0 \ 0 \ \cdots \ 1 \ \cdots \ 0] \mathbf{H}$ 。

在分布式控制中, 只能获取部分储能和节点的信息, 无法获取全局信息。对此设计了一种基于观测器的分布式控制器, 对位于第 m 个储能的控制器 $\mathbf{u}_m(k)$ 为

$$\mathbf{u}_m(k) = \mathbf{K}_m \mathbf{x}_m(k) \quad (17)$$

式中: \mathbf{K} 为反馈增益。 \mathbf{K}_m 为反馈增益 \mathbf{K} 的第 m 行, $\mathbf{K}_m = [0 \ 0 \ \cdots \ 1 \ \cdots \ 0] \mathbf{K}$ 。

根据最优控制原理^[40], 反馈增益 \mathbf{K} 计算表达式为

$$\mathbf{K} = -(\mathbf{R} + \mathbf{B}'\mathbf{P}\mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}'\mathbf{P}\mathbf{A} \quad (18)$$

\mathbf{P} 通过求解 Riccati 方程计算得到, 如式(19)所示。

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}'\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{Q} - \mathbf{A}'\mathbf{P}\mathbf{B}(\mathbf{R} + \mathbf{B}'\mathbf{P}\mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}'\mathbf{P}\mathbf{A} \quad (19)$$

式中: \mathbf{Q} 为电压偏差权重矩阵; \mathbf{R} 为负载率权重矩阵; 矩阵 \mathbf{P} 为 Riccati 方程的对称正定解。

2.4 观测器增益设计

对于第 m 个储能的控制器, 其观测器 $\hat{\mathbf{x}}_m$ 设计为^[44]

$$\hat{\mathbf{x}}_m(k+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_m(k) + \mathbf{B}_m \mathbf{u}_m(k) + \sum_{j=1, j \neq m}^N \mathbf{B}_j \mathbf{K}_j \hat{\mathbf{x}}_m(k) + \mathbf{L}_m [\mathbf{y}_m(k) - \mathbf{C}_m \hat{\mathbf{x}}_m(k)] \quad (20)$$

式中: \mathbf{L}_m 为第 m 个储能的观测器的增益。

定义分布式观测器误差系统的状态矩阵 \mathbf{M} 为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} + \sum_{j=2}^N \mathbf{B}_j \mathbf{K}_j - \mathbf{L}_1 \mathbf{H}_1 & -\mathbf{B}_2 \mathbf{K}_2 & \cdots & -\mathbf{B}_N \mathbf{K}_N \\ -\mathbf{B}_1 \mathbf{K}_1 & \mathbf{A} + \sum_{j=1, j \neq 2}^N \mathbf{B}_j \mathbf{K}_j - \mathbf{L}_2 \mathbf{H}_2 & \cdots & -\mathbf{B}_N \mathbf{K}_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{B}_1 \mathbf{K}_1 & -\mathbf{B}_2 \mathbf{K}_2 & \cdots & \mathbf{A} + \sum_{j=1}^{N-1} \mathbf{B}_j \mathbf{K}_j - \mathbf{L}_N \mathbf{H}_N \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.5 控制器稳定性分析

对于第 m 个储能的控制器, 其观测器误差 $\tilde{\mathbf{x}}_m$ 定义为偏差参数与观测器的差值。

$$\tilde{\mathbf{x}}_m(k) = \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}_m(k) \quad (22)$$

根据式(18)和式(16)可进一步描述为

$$\mathbf{x}(k+1) = (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x}(k) - \sum_{m=1}^M \mathbf{B}_m \mathbf{K}_m \tilde{\mathbf{x}}_m(k) \quad (23)$$

结合式(20)和式(23), 式(22)中第 m 个储能控制器对应的观测器误差的动力学方程为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_m(k+1) = & A\tilde{\mathbf{x}}_m(k) + \sum_{j=1, j \neq m}^N B_j K_j \hat{\mathbf{x}}_j(k) + \\ & L_m [y_m(k) - H_m \hat{\mathbf{x}}_m(k)] \end{aligned} \quad (24)$$

根据式(24)，所有观测器误差系统的动力学方程为

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = M\tilde{\mathbf{x}}(k) \quad (25)$$

通过选择合适的观测器增益 L_m ，使得式(21)中矩阵 M 所有特征值模长小于 1，则在控制器式(20)作用下，观测器系统是稳定的。

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{x}}_m(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}_m(k)\| = 0 \quad (26)$$

此时，根据式(23)和式(25)可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A+BK & G \\ \mathbf{0} & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k) \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中： $G = [-B_1 K_1 \quad -B_2 K_2 \quad \cdots \quad -B_M K_M]$ 。

利用矩阵 $A+BK$ 和 M 的稳定性，得到闭环系统式(25)是稳定的。此外，偏差系统式(27)是稳定的，可以实现电压恢复和储能功率均衡的目标。

2.6 观测器增益优化选取

对于系统式(27)，定义矩阵 W 为

$$W = \begin{bmatrix} A+BK & G \\ \mathbf{0} & M \end{bmatrix} \quad (28)$$

由式(28)可得

$$\left\| \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k+1) \end{bmatrix} \right\| \leq \rho(W) \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k) \end{bmatrix} \right\| \quad (29)$$

式中：“ $\| \cdot \|$ ”表示取范数； $\rho(W)$ 为 W 的谱半径。

为了提高闭环系统的稳定性和收敛速度，观测器增益是通过离线优化得到的，目标是 minimized W 的特征值的模。则观测器增益优化的目标 f 表示为

$$\min f = \rho(W) \quad (30)$$

上述问题为非线性优化问题，可以采用遗传算法进行求解^[27]。

3 仿真分析

3.1 IEEE33 节点系统分析

采用 IEEE33 节点测试系统对所提多目标分布式优化控制策略进行验证分析。系统额定电压为 12.66 kV，电压波动允许范围为 0.95~1.05 p.u.，光伏接入节点为 5、14、19、31，接入容量分别为 1.2、1.0、1.0 和 2.0 MW，储能系统配置于节点 6、11、23 和 28，最大输出功率为 1.2 MW。设置控制器在 1 s 时启动通信，并保持 50 ms 的固定通信间隔。IEEE33 节点系统的拓扑结构及其有功分区结果如图 3 所示。

设定权重系数 $\alpha = 10$ 、 $\beta = 1$ 。通过 MATLAB 2016b 中的遗传算法进行优化计算，得到 IEEE33 节点系统控制器控制增益和观测器增益如表 1 所示。状态偏差参数收敛判据设定为 0.001。

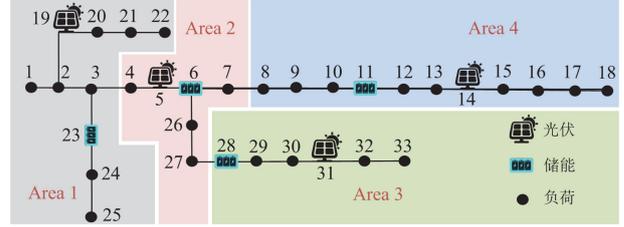


图 3 IEEE33 节点系统拓扑及有功分区

Fig. 3 IEEE33-bus system topology and active partition

表 1 IEEE33 节点系统控制器控制增益和观测器增益

Table 1 Feedback gain and observer gain of IEEE33-bus system

储能	控制增益	观测器增益
1	[-0.095, -0.0425, -0.005, 0.005]	[-0.328, 0.806, -0.904, -0.142]
2	[-0.0878, -0.099, -0.023, 0.001]	[-0.471, 0.955, -0.395, -0.155]
3	[-0.015, -0.025, -0.064, -0.036]	[-0.890, -0.638, 0.999, 0.535]
4	[0.009, 0.005, -0.0101, -0.0533]	[0.618, 0.832, -0.531, 0.996]

3.1.1 控制效果分析

IEEE33 节点系统的电压调节效果和储能负载率分别如图 4 和表 2 所示。在未施加控制前，系统最大电压偏差达 0.0648 p.u.，电压越限；应用分布式控制后，各节点电压均回归到 0.95~1.05 p.u.安全区间。4 个储能单元的充电功率分别为：ESS1 (0.8715 MW)、ESS2(0.9602 MW)、ESS3(1.0330 MW)、ESS4(1.0806 MW)，负载率均处于合理区间。结果表

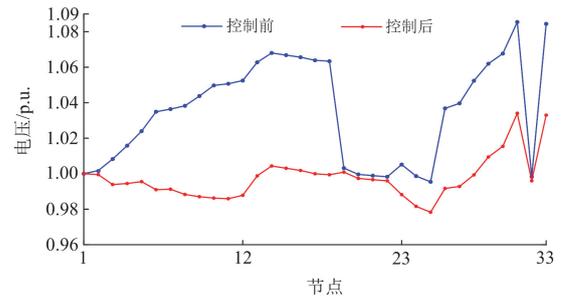


图 4 所提控制方法下 IEEE33 节点系统电压

Fig. 4 Voltages of IEEE33-bus system under the proposed control method

表 2 所提控制方法下 IEEE33 节点系统储能负载率

Table 2 Energy storage load rates under the proposed control method of IEEE33-bus system

	储能 1	储能 2	储能 3	储能 4
负载率	0.7262	0.8001	0.8608	0.9005

明, 所设计的分布式控制器不仅可有效实现电压调节, 同时通过功率合理分配确保了储能系统负载均衡。

储能分布式控制过程中, 所提控制方法下 IEEE33 节点系统储能功率如图 5 所示, 储能状态偏差参数如图 6 所示。系统状态偏差参数在控制器运行 2.5 s 后稳定维持在 0.001 以下, 所设计的控制器通过 25 次控制过程即可实现收敛, 控制速度快。

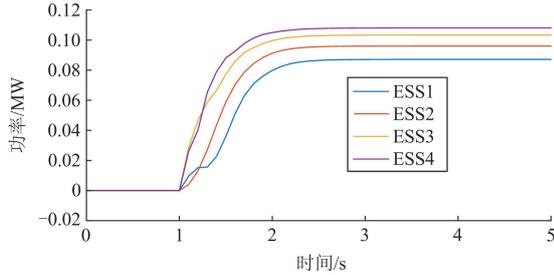


图 5 所提控制方法下 IEEE33 节点系统储能功率
Fig. 5 ESS power of IEEE33-bus system under the proposed control method

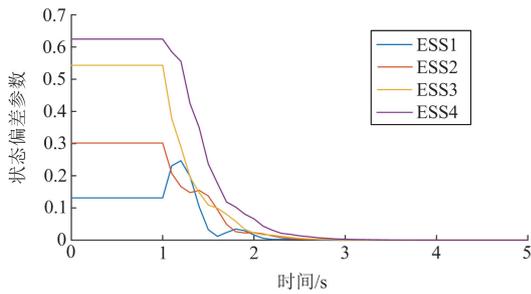


图 6 所提控制方法下 IEEE33 节点系统储能状态偏差参数
Fig. 6 ESS deviation parameter of IEEE33-bus system under the proposed control method

3.1.2 与集中式控制器对比分析

为验证所提控制策略的性能, 将本文所提分布式控制器与集中式控制器进行对比分析。其中, 集中式控制器采用经典线性二次最优控制方法设计系统反馈控制器^[45]。图 7 为两种控制方法下 IEEE33 节点系统储能吸收有功功率情况, 可以看出储能吸收功率相同。表 3 为 IEEE33 节点系统不同控制方法下的储能负载率。

对集中式控制和分布式控制的通信需求进行对比分析。集中式控制和分布式控制的通信结构对比如附录 A 图 A1 所示, 通信需求对比如表 4 所示。可知, 集中式控制采用星型通信拓扑结构, 需要中央控制器与每个储能单元建立独立的双向通信链路, 通信链路数目与储能的数目相同; 分布式控制则基于邻接通信拓扑结构, 仅需在储能单元之间建

立双向通信线路, 无需中央控制器, 通信链路数目为储能数目减 1。相比于集中式控制, 分布式控制不需要中央控制器, 且需要的通信链路更少, 能有效降低通信建设需求。

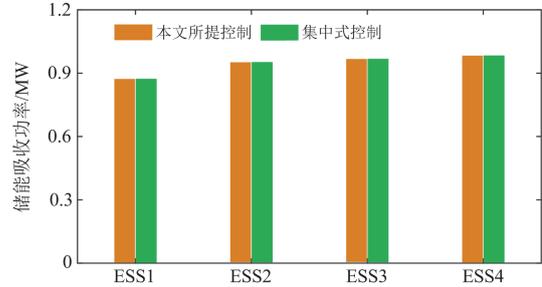


图 7 不同方法下 IEEE33 节点系统储能吸收有功功率
Fig. 7 Active power absorbed by energy storage in the IEEE33-bus system under different methods

表 3 IEEE33 节点系统不同控制方法下储能负载率
Table 3 Energy storage load rates of IEEE33-bus system under different control methods

控制方法	ESS1	ESS2	ESS3	ESS4
本文	0.7263	0.8001	0.8609	0.9005
集中式控制	0.7263	0.8001	0.8609	0.9005

表 4 集中式与分布式控制通信需求对比
Table 4 Communication demand comparison of centralized and distributed control

	集中式控制	分布式控制
通信线路数量	等于储能数目	储能数目减 1
是否需要中央控制器	是	否

3.1.3 控制速度分析

将本文所提方法与文献[45]中的经典分布式优化控制方法进行对比。与本文所提出的基于线性二次最优控制的配电网储能分布式快速调压方法相比, 文献[45]以构建的控制系统的谱半径最小为目标设计反馈增益, 并未采用最优控制理论设计分布式观测器。根据[45]中的控制方法, 经典分布式控制下储能状态偏差参数如图 8 所示。储能状态偏差参数在 1 s 后不断减小, 在 7 s 后小于 0.001, 采用经典分布式方法, 系统在 70 次调控后实现收敛, 在本文所提出的基于线性二次最优控制的配电网储能分布式快速调压方法下系统在 25 次调控后实现收敛, 验证了所提分布式控制器收敛速度快的优点。IEEE33 节点系统经典分布式控制前后电压和储能功率分别如附录 A 图 A2 和图 A3 所示。

进一步将所提方法与文献[46]中基于一致性的分布式控制方法进行对比。在经典的一致性控制中,

反馈控制增益在一定范围内取值，表 5 为不同反馈增益下，文献[46]中一致性算法的收敛速度。当反馈增益为-0.05 时，系统在 35 次调控后实现收敛，较小的反馈增益会导致收敛速度变慢，而较大的反馈增益则会造成系统不稳定。不同反馈增益下控制收敛速度情况见附录 A 图 A4。与传统的基于一致性的分布式控制方法相比，本文所提出的基于线性二次最优控制的分布式控制器不需要人为选取反馈增益，收敛速度更加稳定。

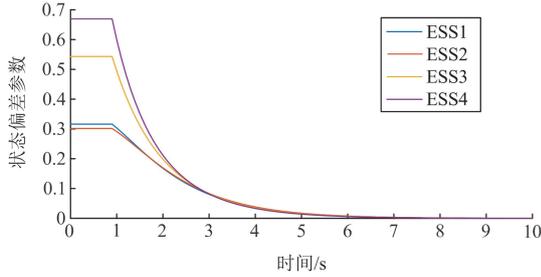


图 8 经典分布式控制下储能状态偏差参数

Fig. 8 ESS state deviation parameters under the classical distributed control algorithm

表 5 基于一致性的分布式控制方法下 IEEE33 节点系统收敛速度

Table 5 Convergence speed of consistency-based distributed control method of IEEE33-bus system

反馈增益	-0.1	-0.05	-0.03	0.01
实现收敛的调控次数	不收敛	35	68	135

3.2 IEEE69 节点系统分析

采用 IEEE69 节点系统对所提分布式控制方法的有效性进行进一步仿真分析，系统在节点 8、12、20、29、47、63 配置储能系统，光伏接入节点为 24、37、43、51、55、67，接入容量分别为 0.75、1.5、0.75、2.0、1.0、1.0 MVA，储能最大充放电功率为 1.2 MW，系统额定电压为 12.66 kV。IEEE69 节点系统的拓扑结构及其集群划分结果见附录 A 图 A5，IEEE69 节点系统控制器控制增益和观测器增益详见附录 A 表 A1。

3.2.1 控制效果分析

在控制过程中，IEEE69 节点系统中各储能负载率数据如表 6 所示，所提控制方法下 IEEE69 节点系统电压如图 9 所示。实施分布式控制前后，系统的最大电压偏差为 0.0657 p.u.。控制完成后，电压水平回归到 0.95~1.05 p.u. 的范围内，储能系统的最大负载率偏差为 0.101。仿真结果表明，所设计的分布式控制器在实现电压调节的同时，能有效确保储能系统负载均衡。

表 6 IEEE69 节点系统储能负载率

Table 6 Energy storage load rates of the IEEE69-bus system

	ESS1	ESS2	ESS3	ESS4	ESS5	ESS6
负载率	0.5493	0.5292	0.4904	0.4549	0.4483	0.4496

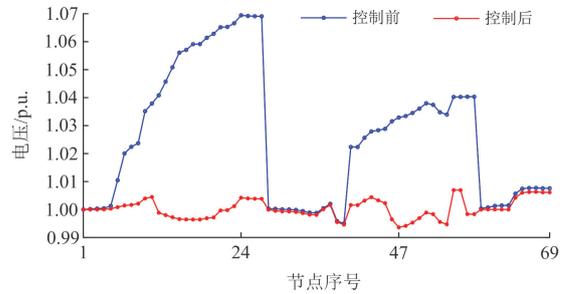


图 9 所提控制方法下 IEEE69 节点系统电压

Fig. 9 Voltage of the IEEE69-bus system under the proposed control method

在控制过程中，所提控制方法下 IEEE69 节点系统储能功率如图 10 所示，储能状态偏差动态变化如图 11 所示。在调节过程中，状态偏差参数在 1 s 后逐渐减小，并在 2.5 s 后收敛至 0.001 以下。通过所设计控制器的协调作用，系统在 25 次调控后实现收敛，验证了所提出的基于线性二次最优控制的配电网储能分布式快速调压方法的快速性。

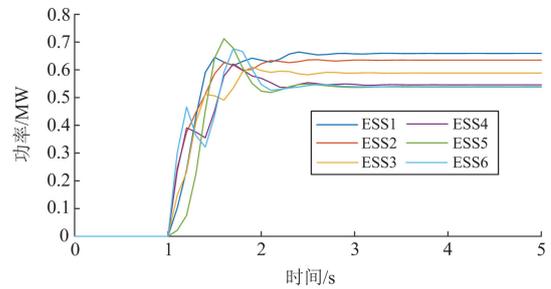


图 10 所提控制方法下 IEEE69 节点系统储能功率

Fig. 10 ESS power of IEEE69-bus system under the proposed control method

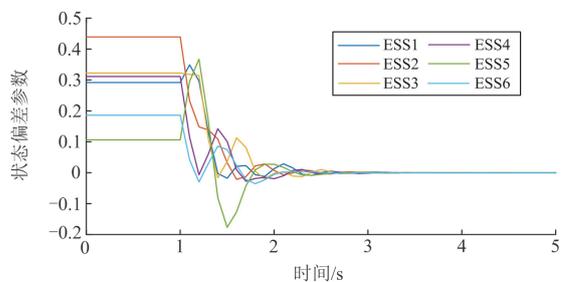


图 11 所提控制方法下 IEEE69 节点系统储能状态偏差参数

Fig. 11 ESS deviation parameter of IEEE69-bus system under the proposed control method

3.2.2 控制速度分析

使用文献[45]中所提出的分布式控制方法来比较收敛速度。在文献[45]所提控制方法下, 系统状态偏差参数动态响应如图 12 所示, 在 7 s 后小于 0.001。采用文献[45]中分布式控制策略, 系统在 70 次调控后实现收敛, 而在本文所提出的基于线性二次最优控制的配电网储能分布式快速调压方法下系统在 25 次调控后实现收敛。

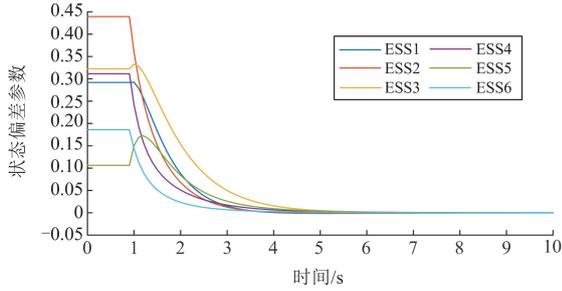


图 12 经典分布式控制下储能状态偏差参数

Fig. 12 ESS state deviation parameters under the classical distributed control algorithm

表 7 为不同反馈增益下 IEEE69 节点系统在文献[46]基于一致性的分布式控制方法下的收敛速度。当反馈增益取值为-0.01 时, 系统在 41 次调控后实现收敛。随着反馈增益的减小, 系统收敛速度明显下降; 而增大反馈增益虽然在初期可能加快收敛, 但也容易引发系统不稳定甚至发散的风险。与基于一致性的分布式控制方法的仿真结果相比, 本文提出的线性二次型最优控制收敛速度快, 且不易发散。

表 7 基于一致性的分布式控制方法 IEEE69 节点系统收敛速度

Table 7 Convergence speed of consistency-based distributed control method of IEEE69-bus system

反馈增益	-0.1	-0.01	-0.005	-0.001
实现收敛的调控次数	不收敛	41	71	170

仿真验证了基于线性二次最优控制的配电网储能分布式快速调压方法在提升调控效率和系统性能方面的显著优势。IEEE69 节点系统在不同控制方法下负载率见附录 A 表 A2。采用基于一致性的分布式控制方法下 IEEE69 节点系统收敛速度见附录 A 图 A6, 经典分布式控制下电压及储能功率分别见附录 A 图 A7 和图 A8。

4 结论

针对高渗透率的分布式光伏系统接入配电网后导致频繁的过电压和集中优化调度速度慢、通信负担重的问题, 本文提出了基于线性二次最优控制

的配电网储能分布式快速调压方法, 得到以下结论。

1) 所提出的储能分布式多目标优化控制策略仅利用相邻集群划分区域的信息即可同时实现电压恢复和储能功率均衡的控制目标, 通信负担小, 无需中央控制器。

2) 通过线性二次最优理论选取观测器增益, 设计分布式控制器, 有效选取观测器增益, 可以提高分布式控制策略的收敛速度, 相比于传统的分布式控制方法平均收敛速度提升了 35%, 实现了电压快速有效调整。

附录 A

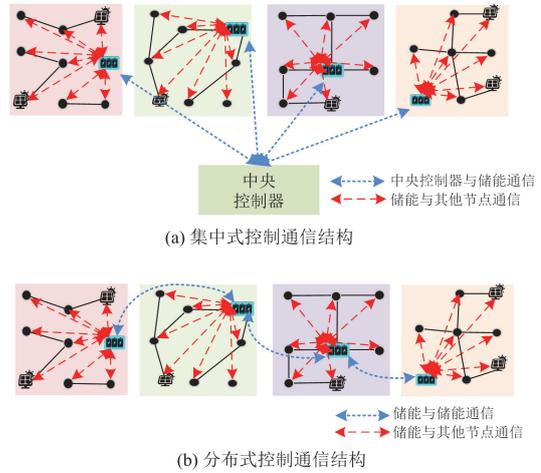


图 A1 集中式控制与分布式控制通信结构对比

Fig. A1 Communication framework comparison under centralized and distributed control

由图 A2 可知, 在调节(1 s)前存在多个电压超限, 调节后各节点电压在 0.95~1.05 p.u.允许范围内。经典分布式控制下 IEEE33 节点系统储能功率如图 A3 所示。1 s 开始充电, 调控过程中 ESS1 充电 0.8693 MW, ESS2 充电 0.9585 MW, ESS3 充电 1.0324 MW, ESS4 充电 1.0801 MW, 在 7 s 后储能释放功率完成。

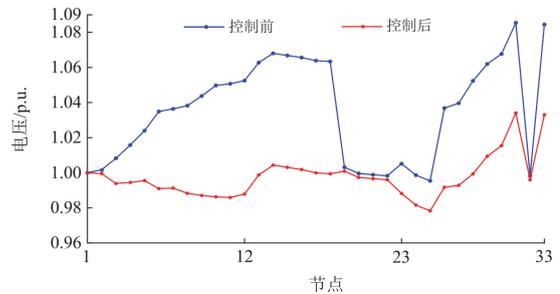


图 A2 经典分布式控制前后 IEEE33 节点系统各节点电压

Fig. A2 Voltages of IEEE33-bus system under the classical distributed control algorithm

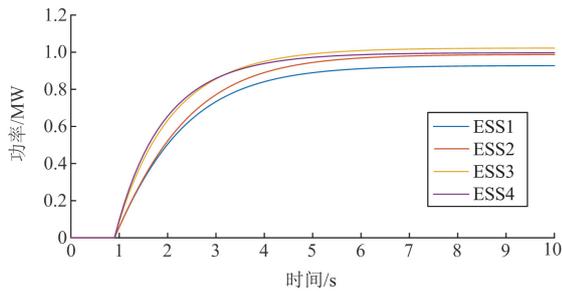
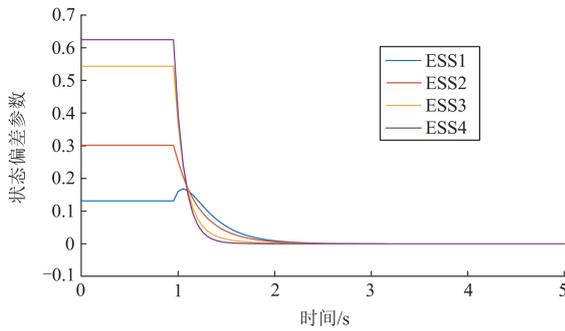
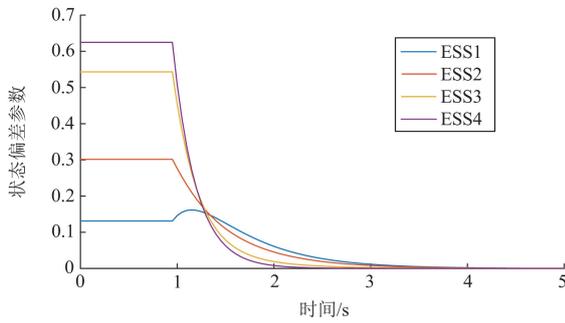


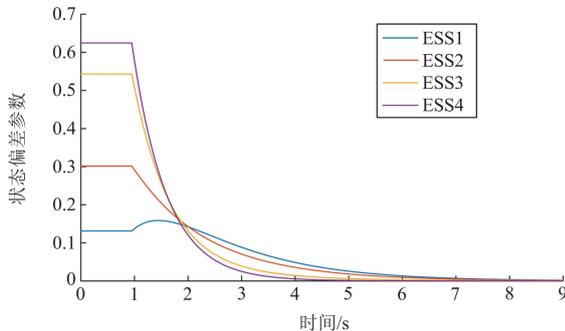
图 A3 经典分布式控制下 IEEE33 节点系统储能功率
Fig. A3 Energy storage power of the IEEE33-bus system under classical distributed control



(a) 梯度下降法反馈增益为-0.05时的收敛速度



(b) 梯度下降法反馈增益为-0.03时的收敛速度



(c) 梯度下降法反馈增益为-0.01时的收敛速度

图 A4 基于一致性的分布式控制方法的收敛速度
Fig. A4 Convergence speed of consistency-based distributed control method

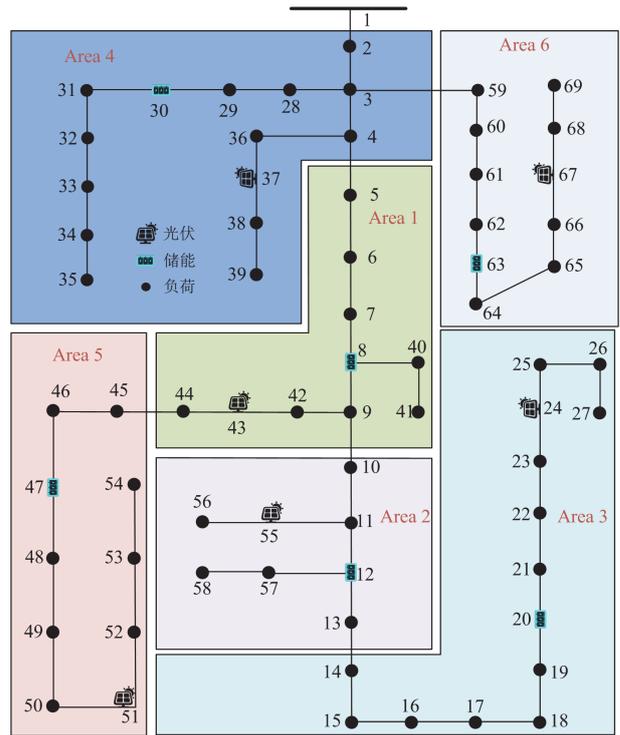


图 A5 IEEE69 节点系统拓扑及有功分区

Fig. A5 IEEE69-bus system topology and active partition

表 A1 IEEE69 节点系统控制器控制增益和观测器增益

Table A1 Feedback gain and observer gain of IEEE69-bus system

储能	控制增益	观测器增益
1	$[-0.077, -0.026, 0.0069, 0.0158, 0.017, 0.018]$	$[0.1920, 0.6228, -0.6661, 0.5682, 0.1095, 0.4068]$
2	$[-0.052, -0.067, -0.004, 0.019, 0.022, 0.023]$	$[-0.8696, 0.9999, 0.1833, -0.3484, -0.3458, -0.2780]$
3	$[0.008, 0.001, -0.049, -0.010, -0.002, 0.003]$	$[-0.2524, 0.8097, 0.9962, -0.6356, 0.8910, 0.5228]$
4	$[0.015, 0.007, -0.027, -0.082, -0.045, -0.022]$	$[-0.3996, 0.7238, -0.0999, 0.8764, 0.7317, -0.4203]$
5	$[0.021, 0.014, -0.007, -0.035, -0.089, -0.049]$	$[-0.7984, -0.9151, 0.6975, 0.1415, -0.5351, 0.3282]$
6	$[0.019, 0.013, -0.006, -0.031, -0.081, -0.157]$	$[0.1086, 0.2967, -0.1543, -0.4453, 0.5081, 0.9975]$

表 A2 IEEE69 节点系统不同控制方法下负载率

Table A2 Energy storage load rates under different control methods of IEEE69-bus system

控制方式	ESS1	ESS2	ESS3	ESS4	ESS5	ESS6
分布式	0.5493	0.5292	0.4904	0.4549	0.4483	0.4496
集中式	0.5493	0.5292	0.4904	0.4549	0.4483	0.4496

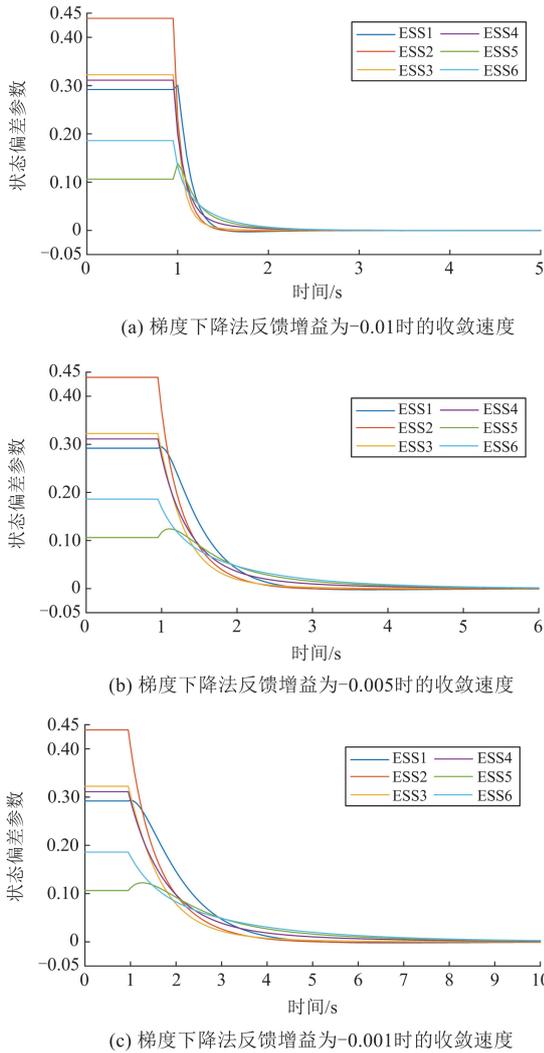


图 A6 基于一致性的分布式控制方法下 IEEE69 节点系统收敛速度

Fig. A6 Convergence speed of IEEE69-bus system under consistency-based distributed control method

经典分布式控制下 IEEE69 节点系统各节点电压如图 A7 所示, IEEE69 节点系统的储能单元功率

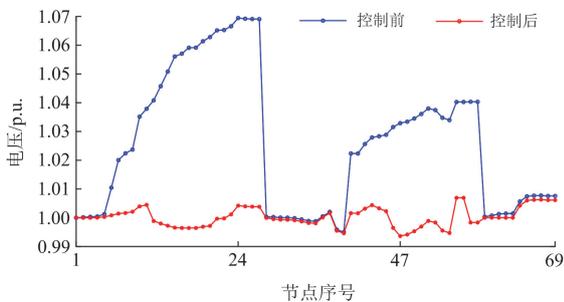


图 A7 经典分布式控制下 IEEE69 节点系统各节点电压
Fig. A7 Voltages of IEEE69-bus system under the classical distributed control algorithm

分布如图 A8 所示。调控过程中, 储能单元 ESS1—ESS6 均处于充电状态, 充电功率分别为 0.659、0.6350、0.5884、0.5460、0.5379 和 0.5395 MW。通过分布式储能系统的协调充电, 有效提升了交流配电网的功率平衡能力, 显著改善了系统的运行稳定性和供电质量。

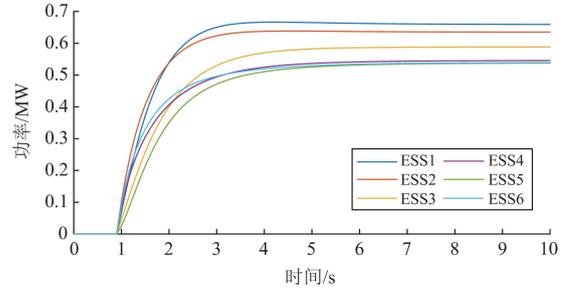


图 A8 经典分布式控制下 IEEE69 节点系统储能功率
Fig. A8 Energy storage power of the IEEE69-bus system under the classical distributed control algorithm

参考文献

[1] 李响, 张丹, 李秋燕, 等. 计及随机性的多分布式电源接入中压配电网承载能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 150-160.
LI Xiang, ZHANG Dan, LI Qiuyan, et al. Hosting capacity evaluation of distributed generators accessing a medium voltage distribution network considering randomness[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 150-160.

[2] 罗斌, 白小龙, 臧天磊, 等. 风光水互补发电系统研究综述[J]. 发电技术, 2025, 46(6): 1097-1111.
LUO Bin, BAI Xiaolong, ZANG Tianlei, et al. Review of research on wind-solar-hydro complementary power generation systems[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(6): 1097-1111.

[3] 尚磊, 唐王倩云, 苏适, 等. 构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 83-93.
SHANG Lei, TANG Wangqianyun, SU Shi, et al. Suppression of transient overvoltage in renewable energy transmission terminal by grid-forming based reactive power compensation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 83-93.

[4] 刘琪, 王守相, 吉兴全. 主动配电网宽适应性潮流灵敏度分析模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 81-88.
LIU Qi, WANG Shouxiang, JI Xingquan. Power flow sensitivity analysis model with wide adaptability for active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 81-88.

- [5] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-580.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-580.
- [6] LIU Q, WANG Y, WANG S, et al. Voltage regulation strategy for DC distribution networks based on coordination of centralized control and adaptive droop control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 3730-3739.
- [7] 王力成, 杨宇, 杨晓东, 等. 考虑非完美通信的高光伏渗透率配电网实时电压协同控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4027-4039.
WANG Licheng, YANG Yu, YANG Xiaodong, et al. Real-time voltage cooperative control in distribution networks with high photovoltaic penetration considering imperfect communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4027-4039.
- [8] 黄大为, 王孝泉, 于娜, 等. 计及光伏出力不确定性的配电网混合时间尺度无功/电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4377-4389.
HUANG Dawei, WANG Xiaoquan, YU Na, et al. Hybrid timescale voltage/var control in distribution network considering PV power uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4377-4389.
- [9] 巨云涛, 周伟鹏, 于宗民. 考虑移动储能车提升系统供电可靠性的配电网规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 128-138.
JU Yuntao, ZHOU Weipeng, YU Zongmin. A distribution network planning approach considering mobile energy storage vehicles to enhance system power supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 128-138.
- [10] 张秀琦, 刘鸿清, 王立强, 等. 基于 Koopman 算子的新能源高占比电网暂态电压失稳识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 10-20, 41.
ZHANG Xiuqi, LIU Hongqing, WANG Liqiang, et al. Transient voltage instability identification based on Koopman operator in power grid with a high proportion of renewables[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 10-20, 41.
- [11] 欧奕昊, 姜彤, 张一航, 等. 考虑变流器无功调节特性的含高比例分布式光伏配电网电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 105-118.
OU Yihao, JIANG Tong, ZHANG Yihang, et al. Voltage regulation method for a distribution network with high-penetration of distributed photovoltaic energy considering a converter's reactive power regulation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 105-118.
- [12] 葛磊蛟, 崔庆雪, 李昌禄, 等. 计及时延的智能配电网光储就地-分布电压优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 48-58.
GE Leijiao, CUI Qingxue, LI Changlu, et al. Local-distributed voltage optimization control method for photovoltaics and energy storage in a smart distribution network considering time delay[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 48-58.
- [13] 米阳, 申杰, 卢长坤, 等. 考虑含储能的三端智能软开关与需求侧响应的主动配电网有功无功协调优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 104-118.
MI Yang, SHEN Jie, LU Changkun, et al. Active and reactive power coordination optimization of an active distribution network considering a three-terminal soft open point with energy storage and demand response[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 104-118.
- [14] 潘江超, 胡雄, 廖才波, 等. 基于状态势博弈的配电网分布式电压调节方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 123-132.
PAN Jiangchao, HU Xiong, LIAO Caibo, et al. A state-based potential game approach for distributed voltage regulation in distribution networks[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 123-132.
- [15] 袁天梦, 杨一宁, 胡泽春. 考虑分布式光伏和储能接入的中低压配电网多时间尺度优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 101-112.
YUAN Tianmeng, YANG Yining, HU Zechun. Multi-time scale optimal dispatch strategy for medium-voltage and low-voltage distribution networks with distributed PV and BESS access[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 101-112.
- [16] 刘洪, 徐正阳, 葛少云, 等. 考虑储能调节的主动配电网有功-无功协调运行与电压控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 51-58.
LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun, et al. Coordinated operation of active-reactive power and voltage control for active distribution network considering regulation of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 51-58.
- [17] MEHDI M, KIM C H, SAAD M. Robust centralized control for DC islanded microgrid considering communication network delay[J]. IEEE Access, 2020, 8(12): 77765-77778.
- [18] LI P, JI HR, WANG C S, et al. Coordinated control

- method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1430-1442.
- [19] BIDRAM A, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3462-3470.
- [20] WANG Z, LIU F, CHEN Y, et al. Unified distributed control of stand-alone DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(1): 1013-1024.
- [21] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [22] LIU Y, LI Y, WANG Y, et al. Distributed real-time multi-objective control of a virtual power plant in DC distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(3): 1876-1887.
- [23] 王守相, 程耀祥, 赵倩宇, 等. 考虑光储协调的配电网多阶段就地-分布式电压控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(1): 1-9.
- WANG Shouxiang, CHENG Yaoxiang, ZHAO Qianyu, et al. Multi-stage local-distributed voltage control strategy for distribution network considering light storage coordination[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(1): 1-9.
- [24] 柴园园, 郭力, 王成山, 等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. *电网技术*, 2018, 42(3): 738-746.
- CHAI Yuanyuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in distribution networks with high penetration of PV[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 738-746.
- [25] DERAKHSHAN S, SHAFIEE-RAD M, SHAFIEE Q, et al. Decentralized robust LMI-Based voltage control strategy for autonomous inverter-interfaced multi-DG Microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(4): 3003-3015.
- [26] LOU G, GU W, WANG J, et al. Optimal Design for distributed secondary voltage control in islanded microgrids: communication topology and controller[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 968-981.
- [27] LIU Q, ZHANG L, ZHANG H, et al. Distributed secondary optimal control with fast voltage recovery and minimum generation cost for islanded DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2025, 16(1): 4-15.
- [28] 董帅, 刘黎, 段天元, 等. 新能源直流组网倍流整流器线性二次型最优控制增强抗扰特性研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(9): 140-149.
- DONG Shuai, LIU Li, DUAN Tianyuan, et al. Disturbance rejection enhancement of current-doubling rectifier in renewable energy DC networking using linear quadratic optimal control[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(9): 140-149.
- [29] XIA P, SHI H, WEN H, et al. Robust LMI-LQR control for dual-active-bridge DC-DC converters with high parameter uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2020, 6(1): 131-145.
- [30] OLALLA C, LEYVA R, EL AROUDI A, et al. Robust LQR control for PWM converters: An LMI approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(7): 2548-2558.
- [31] KHAYAT Y, NADERI M, SHAFIEE Q, et al. Decentralized optimal frequency control in autonomous microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2345-2353.
- [32] ZENG Y, ZHANG Q, LIU Y, et al. Distributed cooperative control strategy for stable voltage restoration and optimal power sharing in islanded DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 3431-3443.
- [33] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [34] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(8): 2187-2201, 2.
- DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(8): 2187-2201, 2.
- [35] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23): 76-83.
- LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accommodation in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23): 76-83.
- [36] 葛津铭, 刘英儒, 庞丹, 等. 含高渗透率光伏配电网的集群划分电压控制策略[J]. *高电压技术*, 2024, 50(1): 74-82.
- GE Jinming, LIU Yingru, PANG Dan, et al. Cluster division voltage control strategy of photovoltaic distribution network with high permeability[J]. *High Voltage Engineering*, 2024,

- 50(1): 74-82.
- [37] 肖传亮, 赵波, 周金辉, 等. 配电网中基于网络分区的高比例分布式光伏集群电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 147-155.
XIAO Chuanliang, ZHAO Bo, ZHOU Jinhui, et al. Network partition based cluster voltage control of high-penetration distributed photovoltaic systems in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 147-155.
- [38] GAO S, CHEN Y, HUANG S, et al. Efficient power flow algorithm for AC/MTDC considering complementary constraints of VSC's reactive power and AC node voltage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2481-2490.
- [39] 李军徽, 孙大朋, 朱星旭, 等. 光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 47-56.
LI Junhui, SUN Dapeng, ZHU Xingxu, et al. Voltage regulation strategy for distributed energy storage considering coordination among clusters with high penetration of photovoltaics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 47-56.
- [40] 丁明, 刘先放, 毕锐, 等. 采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 47-52, 141.
DING Ming, LIU Xianfang, BI Rui, et al. Method for cluster partition of high-penetration distributed generators based on comprehensive performance index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 47-52, 141.
- [41] 曹敬, 金玉龙, 郑涛, 等. 计及分布式电源集群不确定性的配电网分散鲁棒电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 155-166.
CAO Jing, JIN Yulong, ZHENG Tao, et al. A decentralized robust voltage control method for distribution networks considering the uncertainty of distributed generation cluster[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 155-166.
- [42] 黄昊, 倪秋龙, 李震, 等. 考虑柔性负荷无功调节能力的配电网日前两阶段无功随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 23-33.
HUANG Hao, NI Qiulong, LI Zhen, et al. Day-ahead two-stage stochastic reactive power scheduling optimization for a distribution network considering the reactive power regulation capability of flexible loads[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 23-33.
- [43] 李征, 王文宾, 韩胜峰, 等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.
LI Zheng, WANG Wenbin, HAN Shengfeng, et al. Voltage adaptability of distributed photovoltaic access to a distribution network considering reactive power support[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 32-41.
- [44] PATARROYO-MONTENEGRO J F, ANDRADE F, GUERRERO J M, et al. A linear quadratic regulator with optimal reference tracking for three-phase inverter-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 7112-7122.
- [45] YANG S, TAN S, XU J. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4416-4426.
- [46] 周敏, 吕振宇, 王琦, 等. 直流配电网换流站分布式有功-电压二级优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 8002-8011.
ZHOU Min, LÜ Zhenyu, WANG Qi, et al. Distributed secondary power and voltage optimal control strategy for converter station in DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8002-8011.

收稿日期: 2025-05-23; 修回日期: 2025-08-17

作者简介:

刘琪(1992—), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为直流配电系统运行控制; E-mail: qi_liu@sdust.edu.cn

王世友(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化; E-mail: 2382780080@qq.com

时慧喆(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网优化。E-mail: shihuiizhe@sdust.edu.cn

(编辑 张颖)