

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230363

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

曹敬^{1,2}, 金玉龙^{1,2}, 郑涛^{1,2}, 徐俊俊³, 司云强^{1,2}

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 南京邮电大学自动化学院/人工智能学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 随着光伏、储能等分布式电源广泛接入, 导致配电网区域电压波动频繁。针对分布式电源分散接入带来的不确定性问题, 提出了一种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方法。将大规模分布式电源聚合成相互关联的集群, 对电压控制进行分区域调节。首先, 针对配电网结构复杂和分布式电源点多面广的问题, 设计一种基于改进 Louvain 算法的配电网集群划分方案, 利用模块度函数并兼顾了集群的电压灵敏度和分布式电源调控容量。然后, 由于分布式电源接入后配电网潮流更加复杂多变, 在划分集群的基础上提出一种考虑不确定性的分散鲁棒控制方法, 协同各分布式电源集群的调控能力, 抑制由于模型参数及功率波动等不确定性导致的配电网电压波动。最后, 通过算例分析验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 有源配电网; 集群; 分散鲁棒电压控制; Louvain 算法

A decentralized robust voltage control method for distribution networks considering the uncertainty of distributed generation clusters

CAO Jing^{1,2}, JIN Yulong^{1,2}, ZHENG Tao^{1,2}, XU Junjun³, SI Yunqiang^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the access distributed generation such as photovoltaic and energy storage systems, the voltage of the distribution network fluctuates frequently. To solve the uncertainty issues caused by widespread distributed generators, a decentralized robust voltage control is proposed considering the uncertainties of distributed generation clusters. It aggregates large-scale decentralized resources into clusters to perform decentralized voltage control. First, in view of the complex structure of the network and the wide range of generators, a clustering method based on the improved Louvain algorithm is proposed. This further considers the voltage sensitivity and capacity of distributed generators in its modularity function. Second, since the power flow of the distribution network is more variable with distributed generators, a decentralized robust control method considering the uncertainties of the voltage sensitivity is proposed on the basis of cluster divisions. The voltage fluctuations caused by uncertainties such as model parameters and power fluctuations can be suppressed by coordination of controllable clusters. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method is verified by case studies.

This work is supported by the Science and Technology Project of NARI Technology Co., Ltd. (No. 524608210250).

Key words: active distribution network; cluster; decentralized robust voltage control; Louvain algorithm

0 引言

“双碳”目标要求加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系, 而光伏电站、储能等分布式电源由

于无污染且具备可持续性的特点而受到了广泛关注^[1-2], 其大量并网后可缓解用电压力, 改善供电结构。但分布式电源自身具备的波动性与随机性给电力系统运行带来了诸多问题^[3-4], 如高负荷时段与光伏主要出力阶段不匹配, 易带来一系列频率电压问题。中低压末端电网(如城镇级配电网)作为分布式新能源接入的主要场景, 亟需解决新能源消纳问

基金项目: 国电南瑞科技股份有限公司科技项目资助 (524608210250)

题。如何在新能源高渗透场景下,保持末端有源配电网的电压安全稳定,是当前需要解决的关键问题之一^[5-7]。

目前含高比例分布式电源的配电网调压需要发挥分布式电源自身的功率快速响应能力来改善电压质量,充分发挥有功功率和无功功率的调压能力。有功功率主要通过削减光伏出力和储能充放电的方式实现。文献[8]提出了一种基于比例-积分(proportional-integral, PI)双环控制的单机光伏逆变器改进下垂控制方法,使逆变器能够支撑电网并准确注入有功功率。文献[9]利用储能系统辅助主动配电网中分布式电源、有载调压变压器等设备进行调压,实现控制成本最小。无功功率则利用逆变器的剩余容量对电网提供无功支撑。文献[10]提出一种考虑“源-网-荷-储”的主动配电网协调运行调度方法,减少负荷波动和运行成本,使新能源消纳增加。文献[11]针对分布式光伏有功处理的波动性,提出基于仿射可调鲁棒优化的分布式光伏无功功率调节方法,改善光伏本身对于调压的不确定性。文献[12]在考虑了环境温度、太阳辐照度和端电压的情况下,对光伏逆变器的无功能力进行了准确估计,提出一种自适应电压控制器,使之有效参与电压控制辅助服务。综上,上述研究利用配电网中的分布式电源改善电网的电压质量,但一方面以PI控制为主的传统控制方法难以满足多状态、多输入复杂配电系统的性能要求,另一方面,系统级的控制方法研究大都基于理想的集中式控制通信架构,依赖于高可靠性与高实时性数据传输。随着配电网规模与分布式电源接入范围的扩大,受量测覆盖率影响,实现难度会不断提升。

集群控制技术可弥补传统控制方式难以有效管理大量分散资源的不足,日益受到广泛关注。当前集群划分的方法主要有 K -均值法、谱聚类法、复杂网络理论、社区搜索算法等。文献[13]将 K -均值法与智能算法相结合,提高配电网集群划分效果,但计算复杂度较高。文献[14]提出了一种基于谱聚类法的集群划分方法,除了识别、连接和稳定相似大小的集群外,还能够在数据不确定性下有效地执行电压控制。文献[15]在复杂网络理论中考虑不同类型节点间的相互影响,以节点间电气距离结合无功潮流对线路权重赋值,保证集群划分的准确性和快速性。但以上方法并未考虑大规模分布式电源并网后对于集群划分结果的影响,只基于传统电气距离的划分在当今的应用场景下难以保证方法的最优性。然而,社区搜索算法在解决新能源并网场景下各个区域的耦合问题具备良好的效果,便于确定设

备间的耦合关系。在集群划分的基础上,文献[16]结合无功/有功平衡度指标与区内节点耦合度指标形成最佳分区,对配电网进行无功与有功两个层面的光伏集群控制。文献[17]提出了一种考虑集群协同的分散电压控制方法,利用光伏和电动汽车的配合来对电压进行支撑。文献[18]以电气距离为集群划分依据,依据电压越限严重的集群优先与先集群后节点的原则制定了分布式储能集群调压控制策略,提高了储能调压的收益。以上研究都基于稳态模型去设计优化控制方法,既忽略了分布式电源短时间尺度快速响应能力的优势,也没有考虑分布式电源出力波动带来的不确定性。

鲁棒控制方法能够应对来自新能源的扰动,对处理系统级频率电压控制中的不确定性问题具有良好的效果。文献[19-21]针对直流微电网运行场景提出了鲁棒稳定控制方法,提升了分布式电源渗透下的微电网电压稳定性。文献[22-23]提出了一种改进的鲁棒控制策略,用于维持多个分布式电源组成的孤岛微电网的电压稳定性。文献[24]将具有任意连通性的微电网建模为线性时不变系统模型,提出了一种结构化动态输出鲁棒反馈控制方法。但上述研究主要关注分布式电源自身的协同,忽略了区域或集群级别的互动需求。

本文基于上述研究,针对分布式电源自身控制及集群互动协同配合困难等问题,提出一种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方法。首先,基于传统Louvain算法的集群划分方法,考虑电网中电压灵敏度与分布式电源调节容量的特性来对模块度函数进行修正,优化配电网集群的划分效果;然后,基于集群划分结果建立分布式电源的等效模型,并考虑分布式电源出力对模型参数的影响构建含不确定性参数的配电网整体调压模型;进一步,基于集群化分散控制结构,提出分散式鲁棒电压控制方法,抑制分布式电源带来的不确定性;最后,通过算例设计进行仿真分析,并验证所提方法在配电网电压调节效果方面的可行性和有效性。

1 基于Louvain算法的配电网集群划分

随着分布式电源接入配电网的规模不断扩大,集中式的统一控制方式实现难度逐渐增加,对集中控制器的硬件设施和运算能力要求愈发严苛。因此有必要采用去中心化的架构,对电网进行局部划分后构成多个集群,通过相互之间的协同配合调控配电网的整体电压水平。本文通过一种社区检索算法——Louvain算法实现集群划分,Louvain算法基

于模块度函数进行设计, 可以兼顾配电网的电气距离以及用以调压的分布式电源容量。

1.1 Louvain 算法和模块度函数

Louvain 算法由 Girvan 和 Newman 提出, 在配电网划分集群的聚类算法中, Louvain 算法具有明显优势, 能够量化集群划分效果, 而且不需要预先假定集群的数量, 并能够快速计算出集群划分结果。Louvain 算法试图寻找一个集群划分方式使系统的模块度函数最大化, 其优化过程可分为两个步骤: 第一步, 节点间相互连接, 给出最大的模块度函数增益, 并形成本地社区; 第二步, 社区聚合形成虚拟节点, 构成一个新的网络, 重复第一步。整个过程不断重复, 直到没有任何社区能够合并, 且模块度函数达到最大值, 得到最终的集群划分结果。

模块度函数可以用来衡量一个网络特定分区结构强度指标, 是聚类算法的标志。模块度函数越大, 表示集群内节点的耦合程度越强, 不同集群间的耦合关系越弱, 代表集群划分的结果越好。模块度函数定义如式(1)所示。

$$\rho = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j (A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}) \delta(i, j) \quad (1)$$

式中: $m = 0.5 \sum_i \sum_j A_{ij}$, m 为集群划分后每个集群对应边的权重值之和; 若节点 i 和节点 j 间不存在边, 则 $A_{ij} = 0$, 反之则 $A_{ij} = 1$; $k_i = \sum_j A_{ij}$, k_i 为连接至节点 i 的边的权重值之和; 若节点 i 和节点 j 在同一个集群内, 则 $\delta(i, j) = 1$, 反之则 $\delta(i, j) = 0$ 。

当对一个常规网络进行集群划分时, 基础的模块度函数只考虑结构和边的权重。在对一个配电网进行集群划分时, 则还需要考虑电气信息, 根据节点间的电气耦合关系来实现电压控制。本文选择电压灵敏度和电压调节容量两个影响无功调节的主要指标对模块度函数进行改进。

1.2 基于电压灵敏度指标的改进

电压灵敏度描述了节点注入功率对电压幅值的影响情况, 通过对网络对应的雅克比矩阵求逆获得^[25-26]。由于配电网通常为开环运行, 电压灵敏度信息可以通过线性电力系统潮流模型获得, 是对非线性潮流合理的近似。假定电力系统潮流模型满足以下两种条件。

1) 线损远小于支路功率潮流, 可以忽略不计。

2) 潮流模型中可进行 $V^2 \approx V$ 等效, 其带来的误差很小, 因为电网的调压要求为 0.95~1.05 p.u.。基于此线性电网潮流模型, 电压灵敏度可以用线性的方式

不断迭代求解, 在确保准确性的同时提高求解速度。

本文考虑一种辐射型配电区域网络, 在节点 n 处的电压幅值偏差 ΔV_n 和节点 i 注入有功功率 ΔP_i 和无功功率 ΔQ_i 变化的关系为

$$\Delta V_n = S_{i,n}^{VP} \Delta P_i + S_{i,n}^{VQ} \Delta Q_i \quad (2)$$

式中, $S_{i,n}^{VP}$ 和 $S_{i,n}^{VQ}$ 分别为节点 n 对节点 i 注入功率的电压灵敏度系数, 其可以通过式(3)式(4)计算。

$$S_{i,n}^{VP} = \begin{cases} \left(\sum_{j \in M_n^b} R_j \right) / V_0, n \in M_i^n \\ \left(\sum_{j \in M_n^b} R_j \right) / V_0, i \in M_n^n \\ S_{i,Fn}^{VP}, n \notin M_i^n \cap i \notin M_n^n \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{i,n}^{VQ} = \begin{cases} \left(\sum_{j \in M_n^b} X_j \right) / V_0, n \in M_i^n \\ \left(\sum_{j \in M_n^b} X_j \right) / V_0, i \in M_n^n \\ S_{i,Fn}^{VQ}, n \notin M_i^n \cap i \notin M_n^n \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_0 为变压器或馈线所在平衡节点的电压幅值; R_j 和 X_j 分别为支路 j 的阻抗和感抗; M_i^n 为从平衡节点到节点 i 之间所有节点的集合; M_n^n 为从平衡节点到节点 n 之间所有节点的集合; M_n^b 为从平衡节点到节点 n 的支路集合; $S_{i,Fn}^{VP}$ 和 $S_{i,Fn}^{VQ}$ 分别为当节点 n 和节点 i 不在对应集合内所对应的有功和无功电压灵敏度。

接入分布式电源节点的电压无功灵敏度均值 $S_{C_k}^{VQ}$ 和接入储能集群的电压有功灵敏度均值 $S_{C_k}^{VP}$ 可以定义为

$$S_{C_k}^{VQ} = \begin{cases} \text{avg} \sum_{i \in D_{C_k}, n \in N_{C_k}} (S_{i,n}^{VQ}), D_{C_k} \neq \emptyset \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{C_k}^{VP} = \begin{cases} \text{avg} \sum_{i \in E_{C_k}, n \in N_{C_k}} (S_{i,n}^{VP}), E_{C_k} \neq \emptyset \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_{C_k} 为集群 k 内接入储能的节点集合; D_{C_k} 为集群 k 内接入分布式电源的节点集合; N_{C_k} 为集群 k 内所有节点集合。

电压灵敏度均值越高表示集群中的节点对这个

区域的功率注入越敏感,意味着任何注入有功功率和无功功率的变化都会对集群内的节点电压产生较大影响。

1.3 基于分布式电源容量的改进

电压调节容量为来自分布式电源的有功和无功容量。配电网调压的无功容量主要依赖光伏逆变器和储能的无功输出,有功容量主要依赖于储能的充放电计划、最大充放电功率和存储能量。在输电网层级,更高调控灵活性意味着更多的发电设备参与。因此,在配电网中引入相同的概念,高灵活性指增加充电需求,低灵活性指降低充电需求。有功和无功容量可以通过参与的相关电源和集群内的最大电压偏差获得。

在确定工作点的无功电压调节容量 $\phi_{C_k}^Q(t)$ 和有功电压调节容量 $\phi_{C_k}^P(t)$ 计算如式(7)~式(8)所示。

$$\phi_{C_k}^Q(t) = \begin{cases} 1, |\Delta V_n(t)| \leq \sum_{i \in D_{C_k}} Q_i^{\max}(t) S_{i,n}^{VQ} \\ \frac{\sum_{i \in D_{C_k}} Q_i^{\max}(t) S_{i,n}^{VQ}}{|\Delta V_n(t)|}, \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\phi_{C_k}^P(t) = \begin{cases} 1, |\Delta V_n^{\text{ov}}(t)| \leq \sum_{i \in E_{C_k}} R_i^u(t) S_{i,n}^{\text{VP}} \\ \frac{\sum_{i \in E_{C_k}} R_i^u(t) S_{i,n}^{\text{VP}}}{|\Delta V_n(t)|}, |\Delta V_n^{\text{ov}}(t)| > \sum_{i \in E_{C_k}} R_i^u(t) S_{i,n}^{\text{VP}} \\ 1, |\Delta V_n^{\text{un}}(t)| \leq \sum_{i \in E_{C_k}} R_i^d(t) S_{i,n}^{\text{VP}} \\ \frac{\sum_{i \in E_{C_k}} R_i^d(t) S_{i,n}^{\text{VP}}}{|\Delta V_n(t)|}, |\Delta V_n^{\text{un}}(t)| > \sum_{i \in E_{C_k}} R_i^d(t) S_{i,n}^{\text{VP}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $|\Delta V_n(t)|$ 为集群 k 内 t 时刻最大电压偏差的绝对值,若 $V_n(t) > 1.05$, 则 $|\Delta V_n(t)| = |\Delta V_n^{\text{ov}}(t)| = |V_n(t) - 1.05|$, 若 $V_n(t) < 0.95$, 则 $|\Delta V_n(t)| = |\Delta V_n^{\text{un}}(t)| = |V_n(t) - 0.95|$, 如果 t 时刻没有电压越限, 即 $0.95 \leq V_n(t) \leq 1.05$, 则 $|\Delta V_n(t)| = |\Delta V_n^{\text{ov}}(t)| = |\Delta V_n^{\text{un}}(t)| = 0$; $Q_i^{\max}(t)$ 为光伏逆变器 t 时刻能提供的最大无功容量; $R_i^u(t)$ 和 $R_i^d(t)$ 分别为储能 t 时刻可以提供的灵敏度上下限值。

为了在划分集群时考虑系统在未来时域 $[t_0, t_p]$ 内的变化, 将每个时刻的最小有功和无功容量作为模块度函数指标, 以便考虑最坏工况下的集群划分, 为后续实施控制提供了可能。

$$\phi_{C_k}^{\text{Oin}} = \min \phi_{C_k}^{\text{O}}(t), \forall t \in [t_0, t_p] \quad (9)$$

式中, $\phi_{C_k}^{\text{Oin}}$ 为无功调控容量的模块度。

$$\phi_{C_k}^{\text{Pin}} = \min \phi_{C_k}^{\text{P}}(t), \forall t \in [t_0, t_p] \quad (10)$$

式中, $\phi_{C_k}^{\text{Pin}}$ 为有功调控容量的模块度。

集群 k 的电压调节容量可以定义为

$$\phi_{C_k}^{\text{in}} = \min \{ \phi_{C_k}^{\text{Oin}} + \phi_{C_k}^{\text{Pin}}, 1 \} \quad (11)$$

式中, $\phi_{C_k}^{\text{in}}$ 为总调控容量的模块度。

1.4 模块度函数的修正

计及电压灵敏度和电压调节容量后, 模块度函数可以对配电网的集群划分结果进行评估, 修正后的模块度函数如式(12)所示。

$$\rho_m = \zeta_1 \rho + \zeta_2 \frac{1}{N_C} \sum_{k=1}^{N_C} (\zeta_3 S_{C_k}^{\text{VP}} + \zeta_4 S_{C_k}^{\text{VQ}}) \phi_{C_k}^{\text{in}} \quad (12)$$

式中: N_C 表示电网中的集群数量; ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 、 ζ_4 为各部分的权重系数, 且有 $\zeta_1 + \zeta_2 = 1$ 和 $\zeta_3 + \zeta_4 = 1$, 保证模块度函数值处于 0~1。 ρ_m 的值越大, 表示每个节点间的耦合越强, 集群内的电压调节能力越强, 表示集群划分结果越好, Louvain 算法实现流程如图 1 所示。

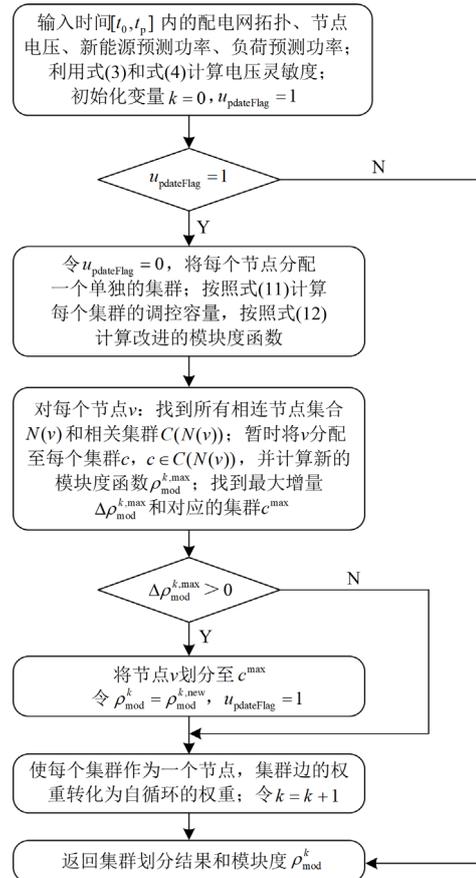


图 1 基于 Louvain 算法的集群划分方法流程图

Fig. 1 Cluster dividing method based on Louvain algorithm

2 配电网集群分散鲁棒电压控制方法

在配电网不同集群中的分布式资源随机性较大, 集群内部电压波动频繁, 集群间的功率流动不确定性增大, 需要通过有效的控制手段提升配电网集群的动态电压调控能力。

2.1 含分布式电源的配电网动态模型

本文考虑配电网集群中所包含的主要分布式电源为光伏系统和储能系统。

光伏系统由大量的光伏阵列经串并联后通过逆变器接入电网, 将其提供的直流功率转化为交流功率, 附录 A 图 A1 表示一种并网型光伏系统接入配电网的结构。以角频率 ω 将相关变量进行 dq 分解后, 得到光伏系统的动态模型, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_d = -\frac{R}{L}I_d + \omega I_q - \frac{E_d}{L} + \frac{v_{pv}}{L}K_d \\ \dot{I}_q = -\omega I_d - \frac{R}{L}I_q - \frac{E_q}{L} + \frac{v_{pv}}{L}K_q \\ \dot{v}_{pv} = \frac{1}{C}i_{pv} - \frac{1}{C}I_dK_d - \frac{1}{C}I_qK_q \end{cases} \quad (13)$$

式中: R 为连接线路的电阻; L 为连接线路和滤波器的电感; C 为直流电容; v_{pv} 为直流电容电压; i_{pv} 为流经直流电容的电流; I_d 和 I_q 分别为逆变器输出电流的 d 、 q 轴分量; E_d 和 E_q 分别为逆变器输出电压的 d 、 q 轴分量; \dot{I}_d 、 \dot{I}_q 、 \dot{v}_{pv} 分别为 I_d 、 I_q 、 v_{pv} 的微分量; K_d 和 K_q 分别为逆变器输出电流 d 、 q 轴分量对应的调节系数。

储能系统直流侧由电池提供直流电压, 多组电池通过变流器接入电网, 与光伏电源不同的是, 储能的功率能够双向流动, 能够吸收和释放能量, 在配电网的调压中具备更强的灵活性, 图 A2 表示一种并网型储能系统的结构, 通过电池、变流器、滤波器和线路连接至配电网中, 其模型表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{1}{\tau_1}(M_d I_{bd} + M_q I_{bq} - I_1) \\ \dot{I}_{bd} = -\frac{R_b}{L_b}I_{bd} + \omega I_{bq} - \frac{E_d}{L_b} + \frac{v_{dc}}{L_b}M_d \\ \dot{I}_{bq} = -\omega I_{bd} - \frac{R_b}{L_b}I_{bq} - \frac{E_q}{L_b} + \frac{v_{dc}}{L_b}M_q \end{cases} \quad (14)$$

式中: τ_1 为储能系统滤波时间常数; R_b 和 L_b 分别为储能系统输出电阻和电感; M_d 和 M_q 分别为 d 、 q 轴的开关函数; I_1 为储能系统输出电流; I_{bd} 和 I_{bq} 分别为输出电流的 d 、 q 轴分量; \dot{I}_1 、 \dot{I}_{bd} 、 \dot{I}_{bq} 分别为

对应变量的微分量; v_{dc} 为储能系统直流侧电压; E_d 和 E_q 分别为电网电压的 d 、 q 轴分量。

假定 $E_d = 0$, 则储能系统输出功率如式(15)所示。

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}E_q I_q \\ Q = \frac{3}{2}E_d I_q \end{cases} \quad (15)$$

由于末端配电网集群线路参数复杂, 节点繁多, 建立高阶动态模型难以实现, 本文采用基于电压灵敏度的方式描述节点电压与分布式电源注入功率的关系, 将式(2)写成矩阵形式如式(16)所示。

$$\begin{cases} \Delta V = S_{VP}\Delta P + S_{VQ}\Delta Q \\ \Delta P = [\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n]^T \\ \Delta Q = [\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_n]^T \\ \Delta V = [\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_n]^T \end{cases} \quad (16)$$

式中: ΔV 、 ΔP 和 ΔQ 分别为电压偏差、注入有功功率增量和注入无功功率增量的向量, 包含每个节点的电压和注入功率; S_{VP} 和 S_{VQ} 分别为有功电压和无功电压灵敏度矩阵。

将式(13)一式(15)离散线性化, 并结合式(16), 根据集群划分结果, 建立多集群协同的配电网整体状态空间模型, 如式(17)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(k+1) &= (\mathbf{A}_i + \Delta \mathbf{A}_i)\mathbf{x}_i(k) + (\mathbf{B}_i + \Delta \mathbf{B}_i)\mathbf{u}_i(k) + \\ &\sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} \{p_{ij}[\mathbf{G}_{ij} + \Delta \mathbf{G}_{ij}]\mathbf{g}_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)\}, i=1, 2, \dots, N_c \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{x}_i(k)$ 和 $\mathbf{u}_i(k)$ 分别是第 i 个集群的状态向量和控制输入; \mathbf{g}_{ij} 是已知的向量值函数, 表示第 i 个集群和第 j 个集群之间的关联; p_{ij} 为区域耦合系数; \mathbf{A}_i 、 \mathbf{B}_i 和 \mathbf{G}_{ij} 为已知的系统矩阵; $\Delta \mathbf{A}_i$ 、 $\Delta \mathbf{B}_i$ 和 $\Delta \mathbf{G}_{ij}$ 为电压灵敏度模型参数不确定的未知矩阵, 并具有以下形式

$$\begin{cases} [\Delta \mathbf{A}_i \ \Delta \mathbf{B}_i] = \mathbf{L}_i \mathbf{F}_i [\mathbf{E}_{1i} \ \mathbf{E}_{2i}] \\ \Delta \mathbf{G}_{ij} = \mathbf{L}_{ij} \mathbf{F}_{ij} \mathbf{E}_{ij} \end{cases} \quad (18)$$

式中: \mathbf{F}_i 和 \mathbf{F}_{ij} 为已知实数矩阵, 且满足 $\mathbf{F}_i^T \mathbf{F}_i \leq \mathbf{I}_i$ 和 $\mathbf{F}_{ij}^T \mathbf{F}_{ij} \leq \mathbf{I}_{ij}$; \mathbf{E}_{1i} 、 \mathbf{E}_{2i} 、 \mathbf{E}_{ij} 、 \mathbf{L}_i 、 \mathbf{L}_{ij} 是已知的实数矩阵。

2.2 分布式电源与传统调压设备的协同

虽然分布式电源的广泛接入改变了配电网的能源结构和调控方式, 但并不能完全取代传统调压设备的功能。本文进一步设计有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)、电容器组与分布式电源之间的协调方式。

OLTC 可以直接改变区域配电网的电压等级,是调压的有效手段,但考虑其生命周期与使用方式,通常尽可能的减少其调压次数,且不作为优先调压手段。因此,本文制定 OLTC 调压规则来实现分布式电源与 OLTC 的协同:首先制定死区电压值 V_{deadband} 和动作延迟时间 T_{delay} , 以主变的中压侧电网电压 V_{MV} 作为 OLTC 的控制电压,当电压越过调压死区的时间超过 T_{delay} 时,则 OLTC 调节其分接头方式如图 2 所示。

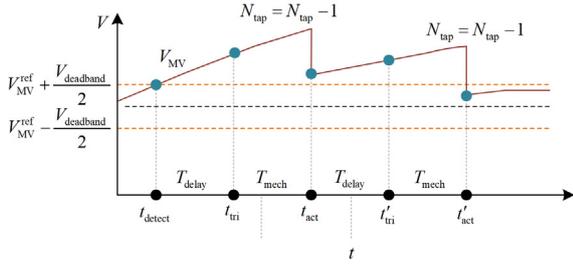


图 2 OLTC 动作规则

Fig. 2 Principle of OLTC operation

$$\Delta N_{\text{tap}} = \begin{cases} +1, & V_{\text{MV}} < V_{\text{MV}}^{\text{ref}} - \frac{V_{\text{deadband}}}{2} \\ -1, & V_{\text{MV}} > V_{\text{MV}}^{\text{ref}} + \frac{V_{\text{deadband}}}{2} \end{cases} \quad (19)$$

式中: V_{MV} 为 OLTC 分接头处电压; $V_{\text{MV}}^{\text{ref}}$ 为 OLTC 动作的参考电压; ΔN_{tap} 为 OLTC 动作量。OLTC 的机械时间延迟 T_{mech} 为分接头从一个位置移动的时间,通常在 3~10 s。因此,假设 OLTC 的分接头动作在 $t = t_{\text{tri}}$ 时触发,则分接头变化的时间可以估算为 $t_{\text{act}} = t_{\text{tri}} + T_{\text{mech}}$, t_{tri} 为信号触发时间, t_{act} 为实际动作时间。

对于电容器组的控制,则通过 15 min 时间尺度的日内电压优化来控制,根据网损等经济性要求优化配电网集群内的电压参考指令,作为配电网小信号建模的额定工作点,其具体优化过程已有很多文献进行研究,因此本文不再叙述。

2.3 分散鲁棒控制器设计

考虑到电压灵敏度受电网注入功率的影响,在分布式电源并网条件下变化尤为突出,为电压的准确控制增加了难度。本文考虑在配电网集群划分的基础上采用一种多区域分散鲁棒控制方法,既对受分布式电源影响的系统灵敏度参数有良好的适应作用,还对其本身的随机出力波动进行抑制。

鲁棒控制考虑配电网中系统模型参数不确定性和外部分布式电源功率扰动的不确定性,使系统具备范数鲁棒性能的闭环动态反馈控制方法。当分布

式电源功率波动导致配电网状态发生改变时,所设计的控制器按照事先制定的控制律计算反馈控制指令,下发至各个控制设备从而抑制控制偏差。通过固定控制律,使配电网在分布式电源波动下的满足系统鲁棒性能要求。

式(18)中的参数不确定结构被广泛应用到不确定系统的鲁棒稳定性问题中。在多集群的电压协同控制中,此结构同样适用。为找到合适的鲁棒控制器将配电网集群进行分散控制,进一步弱化集群间的相互影响,本文做出以下假设:存在已知的实数矩阵 W_i 和 W_{ij} 对于任意向量 x_i 、 x_j 满足式(20)。

$$\|g_{ij}(x_i, x_j)\| \leq \|W_i x_i\| + \|W_{ij} x_j\| \quad (20)$$

式中, W_i 、 W_{ij} 分别表示集群 i 和不同集群 i, j 之间状态量的加权矩阵。如果 $g_{ij}(x_i, x_j)$ 满足上述假设,则其具备 Lipschitz 有界非线性特征。假设对于所有 $i = 1, 2, \dots, N_c$, 都存在

$$R_i = E_{2i}^T E_{2i} > 0 \quad (21)$$

式中: R_i 为判别矩阵; E_{2i} 为已知实数矩阵。

在做出上述假设后,则配电网集群系统的鲁棒稳定性问题可表示为:

设计一个分散线性时不变的鲁棒反馈控制器 $u_i(t) = -K_i x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N_c$, N_c 为集群数量,控制结构如图 3 所示。本文设计的鲁棒控制器是线性反馈控制器,通过实时采集配电网集群的状态数据,根据各集群对应的控制律矩阵 K_i ,实时计算出各分布式电源的控制指令,从而使各节点电压运行在安全范围内。系统(17)满足式(18)条件后,所得到的闭环系统对于范围内的任何不确定性情况,在平衡点附近都具有全局一致渐进稳定性,这表示配电网集群系统对于在某工作点附近能够受到不确定性扰动后,在设计分散鲁棒控制器的作用下仍然能够恢复至稳定工作点。在此种情况下,可称系统(17)在分散控制器矩阵 K_i 下形成的集群闭环系统具备鲁棒稳定性。

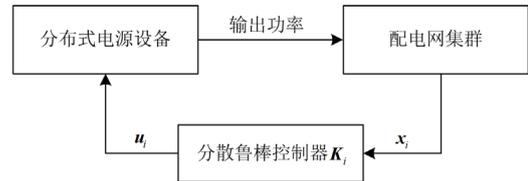


图 3 控制结构

Fig. 3 Block diagram of control structure

为使每个集群的分散控制器 K_i 的参数满足稳定性条件,取 X 、 Y 和 F 为满足矩阵相乘规则的实数矩阵且有 $FF^T \leq I$, 则对于任意给定的标量

$\varepsilon > 0$, 都有

$$XFY + Y^T F^T X^T \leq \frac{1}{\varepsilon^2} X^T X + \varepsilon^2 Y Y^T \quad (22)$$

式中: X 、 Y 和 F 为过渡矩阵; I 为单位矩阵。

取 G 、 L_G 、 E_G 和 F_G 为满足矩阵相乘规则的实数矩阵, 且满足 $F_G F_G^T \leq I$, 则对于任意标量 $\varepsilon > 0$ 且 $\varepsilon^2 E_G^T E_G \leq I$, 则有

$$(G + L_G F_G E_G)(G + L_G F_G E_G)^T \leq G(I - \varepsilon^2 E_G^T E_G)^{-1} G^T + \frac{1}{\varepsilon^2} L_G L_G^T \quad (23)$$

式中, G 、 L_G 、 E_G 和 F_G 为过渡矩阵。

取分段矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} C & D \\ D^T & E \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: C 和 E 为对称矩阵, $C = C^T$, $E = E^T$ 。当且仅当满足以下条件时, H 为正定的。

$$E > 0 \text{ 且 } C - DE^{-1}D^T > 0 \quad (25)$$

$$\text{或 } C > 0 \text{ 且 } E - D^T C^{-1}D > 0$$

选取上述矩阵并建立与不等式约束后, 通过建立代数 Riccati 方程来确定配电网集群系统分散鲁棒控制器的具体参数, 如式(26)一式(27)所示。

$$A_i^T P_i + P_i A_i + P_i \bar{B}_i \bar{B}_i^T P_i - v_i^{-2} B_{p_i}^T R_i^{-1} B_{p_i} + v_i^2 E_{li}^T E_{li} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} p_{ij} (\bar{W}_i^T \bar{W}_j + W_{ji}^T W_{ij}) + \bar{Q}_i = 0 \quad (26)$$

$$\bar{B}_i \bar{B}_i^T = v_i^{-2} L_i L_i^T + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} p_{ij} [G_{ij} (I - \lambda_{ij}^2 E_{ij}^T E_{ij})^{-1} G_{ij}^T + \lambda_{ij}^{-2} L_{ij} L_{ij}^T] \quad (27)$$

式中: $B_{p_i} = B_i^T P_i + v_i^2 E_{2i}^T E_{li}$; \bar{B}_i 为过渡矩阵; p_{ij} 为耦合系数; v_i 和 λ_{ij} 为实数, 且 λ_{ij} 满足 $\lambda_{ij} E_{ij}^T E_{ij} < I$; \bar{Q}_i 为正定矩阵; L_i 、 R_i 、 L_{ij} 、 G_{ij} 、 E_{ij} 为构建 Riccati 方程对应的实数矩阵。

因此配电网集群分散鲁棒稳定性问题可表示为: 考虑配电网集群系统满足式(20)一式(21), 如果存在正参数 $v_i > 0$, $\lambda_{ij} > 0$, 使 $\lambda_{ij} E_{ij}^T E_{ij} < I$, 且式(26)存在正定解 P_i , 则存在合适的线性反馈控制器 $K_i = v_i^{-2} R_i^{-1} (B_i^T P_i + v_i^2 E_{2i}^T E_{li})$ 使系统闭环鲁棒稳定。

$$u_i(t) = -K_i x_i(t) \quad (28)$$

至此, 集群分散鲁棒控制器 K_i 的参数制定完成, 当每个集群的状态量 x 测量完成时, 通过与 K_i 的线性计算可获得每台储能、光伏设备的控制指令 u_i 。设计集群系统分散反馈控制器流程如下。

第一步: 建立系统模型(17), 得到相关的系统矩阵 A_i 、 B_i 、 G_{ij} 、 ΔA_i 、 ΔB_i 、和 ΔG_{ij} ;

第二步: 按照式(18)构建描述系统不确定性的矩阵;

第三步: 对于集群 i 构建 Riccati 等式(26);

第四步: 选择换算因数 v_i 和 λ_{ij} , 如果有正定矩阵 P_i 满足式(26), 则式(28)为系统分散鲁棒控制器。

2.4 通信延迟分析

考虑配电网集群内通信结构与条件的不完善, 可能存在控制延迟。当系统存在通信延迟为 d 时, 控制输入式(28)变为 $u_i(t-d) = -K_i x_i(t-d)$, 则省略扰动项后闭环系统可表示为

$$x_i(t+1) = [A_i + L_i F_i E_{li}] x(t) + [B_i + L_i F_i E_{2i}] K_i x_i(t-d) \quad (29)$$

对于上述系统, 如果存在对称正定矩阵 M_i 和 N_i , 使得式(30)成立。

$$\begin{bmatrix} \Theta_i + N_i & P_i K_i (B_i + L_i F_i E_{2i}) \\ (B_i + L_i F_i E_{2i})^T M_i & -N_i \end{bmatrix} \leq 0 \quad (30)$$

式中, $\Theta_i = (A_i + L_i F_i E_{li})^T M_i + M_i (A_i + L_i F_i E_{li})$ 。

则称系统(29)是二次稳定的, 且该系统一定是鲁棒渐近稳定的^[27-28]。

3 算例分析

3.1 系统设置

本文通过一个改进 123 节点的配电网来验证基于光储集群协同的配电网电压控制效果, 具体拓扑见图 4。分布式电源的接入类型、接入位置、额定功率等参数设置见附录 B 表 B1, 仿真系统通过 Matlab/Simulink 平台进行验证, 控制器采样时间设置为 0.01 s。

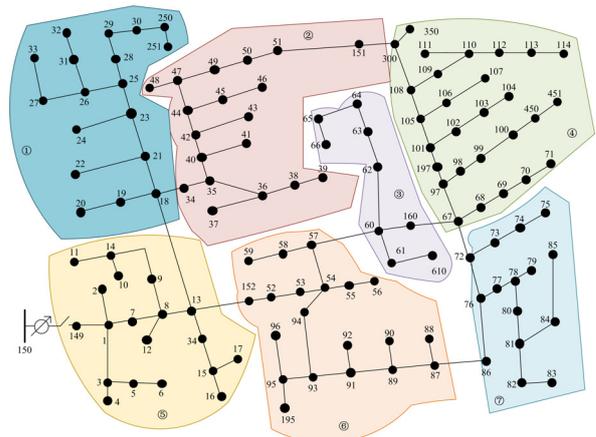


图 4 光储集群化配电网结构图

Fig. 4 Structure of the distribution network based on clusters of PV and energy storage

3.2 集群划分效果验证

选取实际某天光照幅度最高的时刻作为电网的典型运行状态，依据本文方法设计模块度函数对123节点配电网系统进行集群划分，结果如图4所示，不同颜色的部分表示集群划分结果，模块度函数变化如图5所示。当电网节点数目为123时，算法从集群数量为123时开始逐步迭代，同时计算系统的模块度函数指标，一直到集群数量为7时，模块度函数达到了最大值，因此得到系统的最优集群划分结果，为后续的控制设计提供了基础。

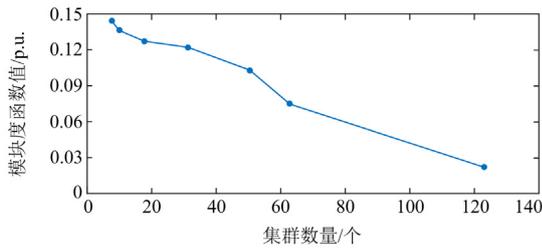
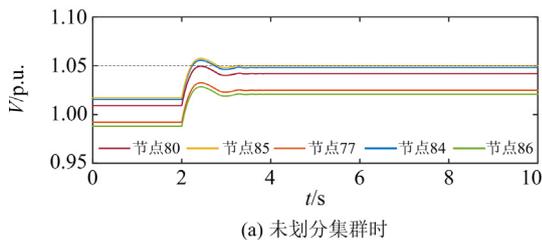
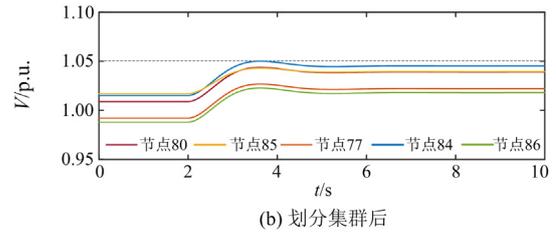


图5 改进后的模块度函数图
Fig. 5 Modified modularity function

为验证集群划分对于配电网电压控制效果，本文对于集群划分前后的控制效果进行说明。节点电压越限后，传统控制通常调节对节点影响最大的分布式电源，并根据节点电压越限幅度及两节点间电压灵敏度来确定分布式电源的具体出力值。本文采用集群划分的方式，将配电网划分成各个区域，并建立每个区域的集群控制器，通过对区域内所有分布式电源功率的调节，改善区域整体电压分布。选取配电网末端受功率波动敏感的节点，来分析不同方法的控制效果。如图6(a)所示，未划分集群时，采用传统方式进行调压，在末端节点85发生电压越限后，在节点84处接入分布式光伏输出无功功率进行调压，但由于其无功容量受自身有功出力的限制，导致84节点电压继续发生越限的情况，直到节点80发生电压越限时，对其电压影响最大的77节点位置的分布式储能才开始动作，将电压调至合格范围内。引入基于集群划分的分散控制方法后，如图6(b)所示，集群内的任意节点电压都受到群内分布式电源的协同控制，使集群内整体电压维持在合格区间内，避免传统调压方式导致末端节点越限。



(a) 未划分集群时



(b) 划分集群后

图6 集群划分前后区域7电压的控制效果图

Fig. 6 Waveform of control effect of bus voltage in area 7 with and without clusters

3.3 鲁棒电压控制效果验证

本文选取配电网的某一典型工作场景进行仿真。模拟天气变化时，光伏发电的骤升和骤降，在4s时部分光伏输出功率升高，12s时光伏输出功率突然降低，由于这种场景下光伏渗透率较高且负荷不足，电网电压受光伏影响严重，易发生越限问题。

为说明所提方法的有效性，本文以其中3个集群的电压情况为例说明调压情况，分别为集群1、集群4和集群7。集群1为靠近主变的集群，集群4和集群7为配电网末端集群，更容易受新能源影响。图B1表示无控制施加情况下各集群的电压变化情况。在中低压电网线路高阻感比的情况下，有功出力对电网电压变化影响很大。施加本文所提的分散鲁棒控制方法后，各集群电压变化如图7所示。从图7中可观察到在4s和12s末，集群4和集群7内部分节点电压已经超过了安全区间0.95~1.05 p.u.，且电压长时间处于越限工况下，尤其是集群4和集群7的末端节点67和节点74的电压水平分别达到了1.07 p.u.、0.93 p.u.和1.06 p.u.、0.94 p.u.，因此需对集群系统实施控制来恢复其电压水平。在各集群中，当4s和12s发生光伏出力的剧烈波动时，各鲁棒控制器能够迅速响应抑制电压的快速波动，降低超调量，提升响应速度。在配电网场景中，与PI控制相比，本文所提的基于光储集群的分布式鲁棒控制对电压的稳定性具有更好的控制效果。

为验证本文控制方法的有效性，选取光伏剧烈波动的时间段进行分析。在光伏剧烈波动的工况下，配电网的灵敏度参数、功率流动存在更加显著的不确定性。如图8(a)所示，在常规鲁棒控制方法的作用下，不确定性导致配电网集群的电压波动非常剧烈，当大量光伏注入功率变化时，仍易发生短时间电压越限的情况，在10s前后发生电压越上限的情况。相比之下，如图8(b)所示，当采用本文考虑不确定性

的鲁棒控制方法后, 光伏输出功率的突变引起的电压波动明显被抑制, 电压控制效果更加平稳。

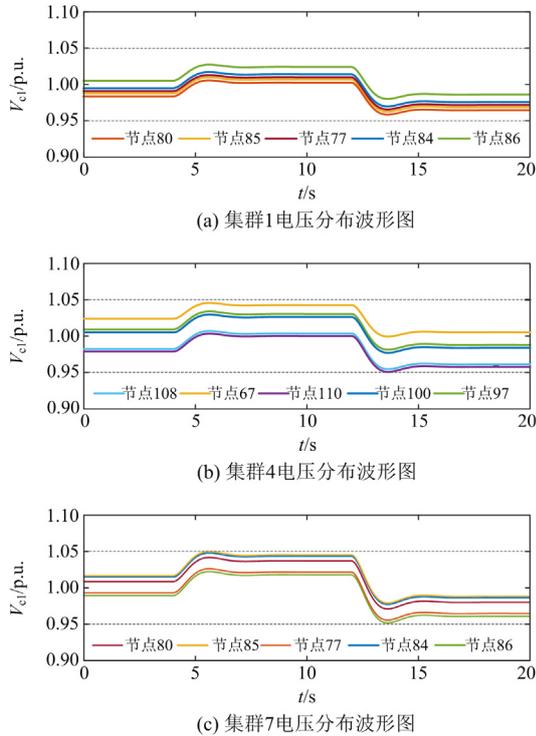


图7 配电网整体电压控制效果

Fig. 7 Waveform of bus voltage of the distribution network

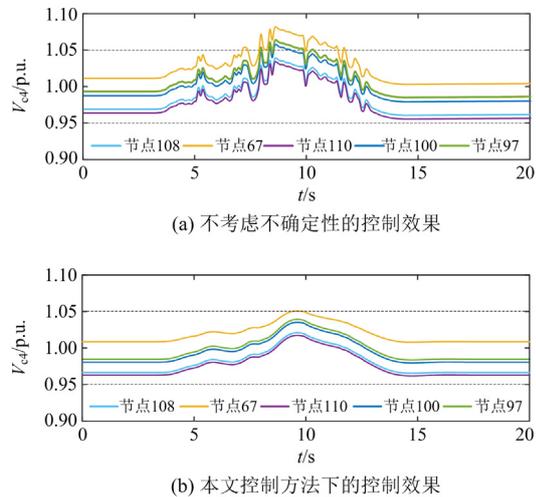


图8 含不确定性工况下集群4电压波形图

Fig. 8 Waveform of bus voltage of the 4th cluster in the distribution network with uncertainties

3.4 不同通信架构下的鲁棒控制效果验证

为验证不同通信架构下控制方法的鲁棒性, 本文分别选取末端集群4、集群6和集群7中对应的关键电压节点74、76、81作为鲁棒控制效果分析的

目标。在4s和12s分别引入阶跃负荷波动, 对比集中控制和分散控制两种不同通信架构的鲁棒性。当无控制延迟时, 控制结果如图9所示, 分散鲁棒控制与集中鲁棒控制在控制效果上相似, 分散控制与集中控制的结果偏差不高于0.005 p.u., 这种误差并不影响电压控制的性能。在此场景下, 当存在1s以内的随机控制延迟时, 控制结果如图10所示。由于大规模配电网的集中式通信架构更为复杂, 与分布式电源的互动效率较低, 因此与集群分散控制相比, 集中控制受通信延迟的影响更大。通信延迟会导致明显的不同步性, 其中集中鲁棒控制导致更为频繁的电压波动, 向稳态收敛的时间更长, 分散鲁棒控制在此算例下能够明显缩短2s以上的收敛时间, 并降低5%以上的动态电压波动最大值, 体现了分散控制的有效性。

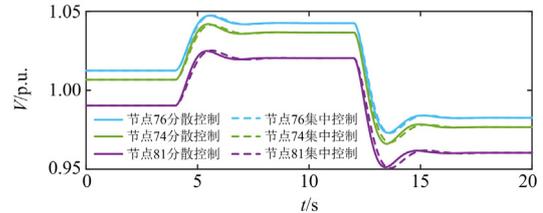


图9 无延迟鲁棒控制效果图

Fig. 9 Waveform of bus voltage with robust control without time delay

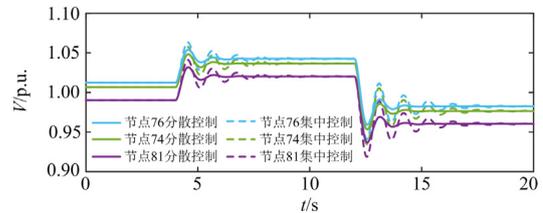


图10 含延迟鲁棒控制效果图

Fig. 10 Waveform of bus voltage with robust control with time delay

3.5 考虑源荷不确定性的鲁棒控制效果验证

为验证所提控制方案与常规考虑源荷不确定性的鲁棒优化方法的差异性, 本文基于分散控制架构对两者展开对比分析。通常的鲁棒优化需考虑分布式电源最坏情况下的扰动, 在每个控制时刻进行配电网的潮流优化, 因此庞大的计算量难以在秒级的时间尺度完成。在本文算例场景下, 设置连续扰动对鲁棒控制和鲁棒优化的效果进行对比, 结果如图11所示。可以从图中虚线部分的电压波形看出, 电压波动较大, 在20min和40min时, 电网整体电

压受到控制,但由于扰动实时变化,在每个控制间隔内的电压波动非常频繁,而基于潮流运算的鲁棒优化方法难以在秒级时间尺度实现有效控制,因此部分波动较大的扰动发生时电压会出现短暂的越限。而本文所提的鲁棒控制方法是离线计算控制律,在运行中能够更好地实时抑制连续扰动,如图 11 中实线部分。在 20 min 和 40 min 电压扰动过大时,OLTC 按照本文的控制方式触发动作,改变整体电压分布,在其他时间连续扰动发生时可在秒级进行响应,使分布式电源设备连续动作来抑制扰动,将电压波动降低。

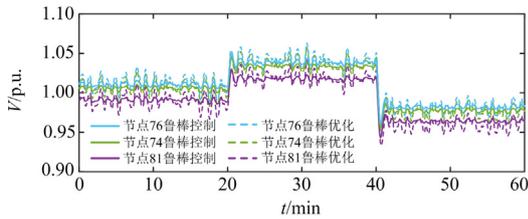


图 11 源荷不确定性场景下的控制效果图

Fig. 11 Waveform of control effect considering uncertainties in source and load

4 结论

在现有中低压配电网电压控制领域,多集中于长时间尺度的集中优化运行方法,难以适应高比例光伏接入的高随机性运行场景。本文针对高比例光伏接入的配电网提出一种面向光储集群协同的分布式鲁棒电压控制方法,将分散布局的分布式电源聚合进行集群划分,在传统 Louvain 算法的基础上考虑调压的灵敏度和分布式电源的调控容量,提高了集群划分的有效性。在此集群划分的基础上,鲁棒控制器的设计则有据可依,具备分散设计的模型基础。针对配电网自身具备的潮流特性与分布式电源的随机性和波动性,利用分散鲁棒控制策略可更有效地对此类不确定性带来的电压波动进行抑制。

附录 A

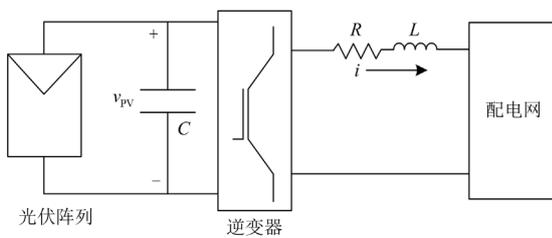


图 A1 光伏系统结构图

Fig. A1 Structure of PV system

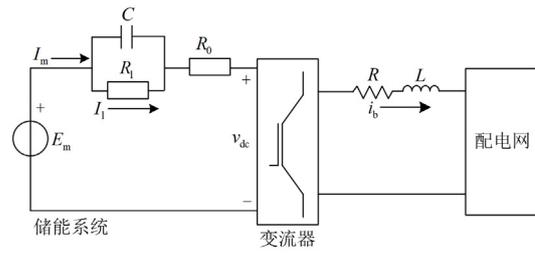


图 A2 并网型储能系统结构图

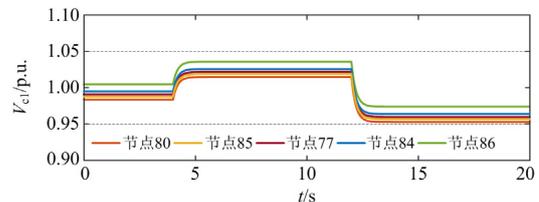
Fig. A2 Structure of grid-connected ESS

附录 B

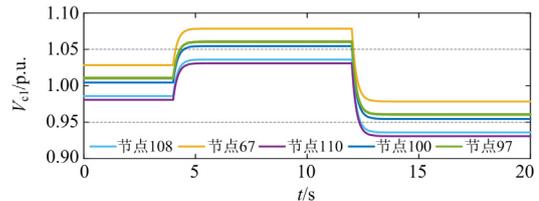
表 B1 分布式电源参数

Table B1 Parameters of DGs

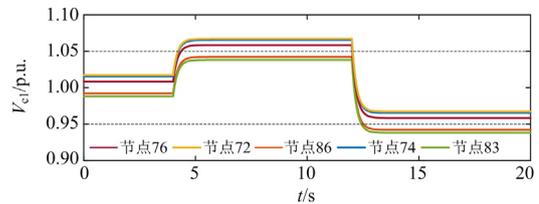
类型	位置	额定功率/kW	额定容量/kWh
分布式 光伏	12,23,41,57,63,74	300	—
	27,34,45,84,91,107	400	—
	30,50,70,88,100,	350	—
分布式 储能	22,47,52,62,108	400	400
	7,28,42,57,84,97,	500	500
	13,38,77,89,105	450	450



(a) 集群1电压波形图



(b) 集群4电压波形图



(c) 集群7电压波形图

图 B1 无控制下有源配电网集群电压波形图

Fig. B1 Waveform of bus voltage of active distribution network without controller

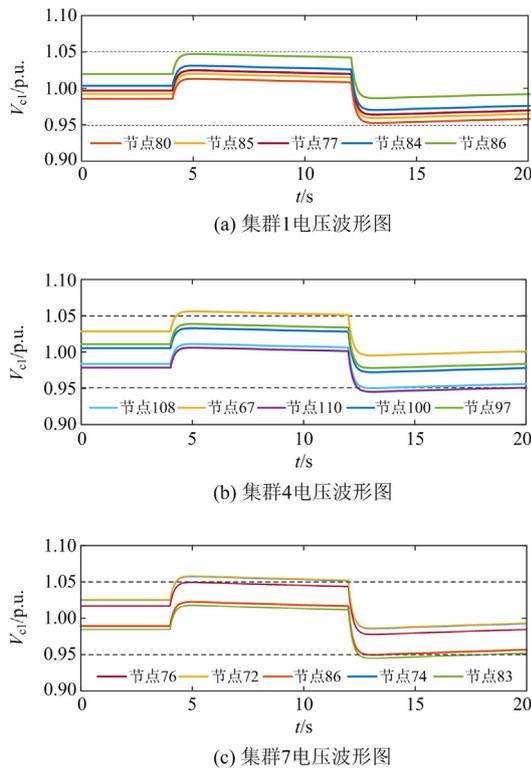


图 B2 PI 控制下有源配电网集群电压波形图

Fig. B2 Waveform of bus voltage of distribution network with PI control

参考文献

- [1] 田福银, 马骏, 王灿, 等. 基于双层主从博弈的综合能源系统多主体低碳经济运行策略[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 184-193.
TIAN Fuyin, MA Jun, WANG Can, et al. Multi-agent low-carbon and economy operation strategy of integrated energy system based on bi-level master-slave game[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 184-193.
- [2] 刘道兵, 袁野, 李世春, 等. 利用氢储能含可再生能源系统容量配置综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 1-13.
LIU Daobing, YUAN Ye, LI Shichun, et al. A review of capacity allocation of renewable energy system using hydrogen storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 1-13.
- [3] 杨玉龙, 王甜甜, 陈祥, 等. 考虑新能源消纳的电采暖集群多功率级控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 20-30.
YANG Yulong, WANG Tiantian, CHEN Xiang, et al. Multi-power level control strategy of an electric heating cluster considering new energy consumption[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 20-30.
- [4] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 801-813.
- [5] 徐俊俊, 吴在军, 胡秦然, 等. 考虑多类型分布式电源和负荷不确定性的主动配电网区间状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3255-3266.
XU Junjun, WU Zaijun, HU Qinran, et al. Interval state estimation for active distribution networks considering uncertainties of multiple types of DGs and loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3255-3266.
- [6] 杨亘焯, 孙荣富, 丁然, 等. 计及光伏多状态调节能力的配电网多时间尺度电压优化[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 105-114.
YANG Genye, SUN Rongfu, DING Ran, et al. Multi time scale reactive power and voltage optimization of distribution network considering photovoltaic multi state regulation capability[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 105-114.
- [7] XU Junjun, WU Zaijun, WU Qiuwei, et al. A robust Restoration decision-making strategy for unbalanced distribution networks considering the uncertainty of photovoltage generators[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108202.
- [8] MENG Xin, LIU Jinjun, LIU Zeng. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [9] 蔡宇, 林今, 宋永华, 等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 42-49.
CAI Yu, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Voltage control strategy in active distribution network based on model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 42-49.
- [10] 罗金满, 刘丽媛, 刘飘, 等. 考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 167-173.
LUO Jinman, LIU Liyuan, LIU Piao, et al. An optimal scheduling method for active distribution network considering source network load storage coordination[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 167-173.
- [11] 李晓明, 刘翔宇, 李安昌, 等. 配电网电压控制的分布式光伏无功仿射可调鲁棒优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 124-131.
LI Xiaoming, LIU Xiangyu, LI Anchang, et al. Distributed photovoltaic reactive power affine adjustable robust optimization method for voltage control of a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 124-131.

- [12] KARBOUJ H, RATHER Z, PAL B. Adaptive voltage control for large scale solar PV power plant considering real life factors[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 990-998.
- [13] LÜ Nanjun, LIU Xuetao, HU Junjie, et al. Cluster partition method development for high penetration of distributed photovoltaics using intelligent algorithm and K-means[C] // 2022 IEEE 5th International Conference on Electronics Technology (ICET), May 13-16, 2022, Chengdu, China: 1255-1260.
- [14] NAZIR F U, PAL B C, JABR R A. Affinely adjustable robust Volt/VAr control without centralized computations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 656-667.
- [15] 郑吉祥, 钟俊. 基于节点类型和分区耦合性的复杂网络无功电压快速分区方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 223-230.
ZHENG Jixiang, ZHONG Jun. A complex network theory fast partition algorithm of reactive voltage based on node type and coupling of partitions[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 223-230.
- [16] 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.
- [17] WANG L, DUBEY A, GEBREMEDHIN A, et al. MPC-based decentralized voltage control in power distribution systems with EV and PV coordination[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2908-2919.
- [18] 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.
- [19] 王晓兰, 王科祖. 基于 LMI 的直流微电网分布式鲁棒 H_∞ 控制[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 45-52.
WANG Xiaolan, WANG Kezu. Distributed robust H_∞ control in DC microgrid based on linear matrix inequalities NEQUALITIES[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(5): 45-52.
- [20] LIU J, ZHANG W, RIZZONI. Robust stability analysis of DC microgrids with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 851-860.
- [21] BARANWAL M, ASKARIAN A, SALAPAKA S, et al. A distributed architecture for robust and optimal control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 3082-3092.
- [22] SHAFIEE M, SHAFIEE Q, SADABADI M, et al. Decentralized voltage stabilization and robust performance satisfaction of islanded inverter-interfaced microgrids[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 1893-1904.
- [23] DERAKHSHAN S, SHAFIEE M, SHAFIEE Q, et al. Decentralized voltage control of autonomous DC microgrids with robust performance approach[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5508-5520.
- [24] BABAZADEH M, NOBAKHTI A. Robust decomposition and structured control of an islanded multi-DG microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2463-2474.
- [25] 乐健, 周谦, 王曹, 等. 基于分布式协同的配电网电压和功率优化控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1249-1257, 1415.
LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on voltage and power optimal control strategy of distribution network based on distributed collaborative principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1249-1257, 1415.
- [26] 杜鹏, 米增强, 贾雨龙, 等. 基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置与容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 103-109.
DU Peng, MI Zengqiang, JIA Yulong, et al. Optimal placement and capacity of distributed energy storage in distribution system based on the sensitivity variance of network loss[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 103-109.
- [27] 俞立. 鲁棒控制: 线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [28] SONMEZ S, AYASUN S, NWANKPA C O. An exact method for computing delay margin for stability of load frequency control systems with constant communication delays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 370-377.

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-07-11

作者简介:

曹敬(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源及储能调控管理、虚拟电厂、综合智慧能源服务等; E-mail: caojing2@sgepri.sgcc.com.cn

金玉龙(1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源调控管理、虚拟电厂与电力市场研究等; E-mail: jinyulong@sgepri.sgcc.com.cn

郑涛(1977—), 男, 通信作者, 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为新能源调控管理、虚拟电厂与电力市场研究等。E-mail: zhengtao2@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 张颖)