

# 考虑网络分区的含高比例分布式光伏配电网电压协调控制

嵇岩<sup>1</sup>, 杨丹丹<sup>1</sup>, 周政东<sup>1</sup>, 陆昱丞<sup>1</sup>, 靖知川<sup>1</sup>, 马潇男<sup>2</sup>

(1.江苏东港能源投资有限公司, 江苏 连云港 222042; 2.南京邮电大学 自动化学院、人工智能学院, 江苏 南京 210032)

**摘要:** 针对高比例分布式光伏接入配电网,传统集中式控制难以适应高维度环境下电压控制问题,文章提出了一种考虑网络分区的含高比例分布式光伏配电网电压协调控制策略。首先,根据分区函数算法将配电网划分为集中拓扑和局部拓扑;其次,针对集中拓扑,以电压偏差与网损之和最小为目标函数,建立基于二阶锥规划(Second Order Cone Programming, SOCP)的配电网电压集中控制模型,针对局部拓扑,以节点电压偏差最小为目标函数,建立马尔科夫决策过程参与的电压精细化控制模型;再次,分别采用 CPLEX 求解器和深度确定性梯度算法对区域模型进行有效求解;最后,将该控制策略应用于某实际 35 kV/10 kV 的配电网中。仿真实验表明,文章所提策略具有良好的控制效果,保证配电网安全运行的同时提高了光伏渗透率。

**关键词:** 配电网; 分布式光伏; 电压控制; 网络分区

**中图分类号:** TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)10-1399-09

## 0 引言

随着大规模分布式光伏(DPV)的接入,配电网的结构变得更加复杂<sup>[1,2]</sup>。含高比例分布式光伏的现有配电网可控调压设备数量众多,电压波动的现象更加普遍,且难以进行调度控制,在这种情况下,针对现有配电网采用电网分区、分层的方法可以简化电网结构,降低电力系统维度。因此,有必要对现有配电网采用网络分区的电压控制策略<sup>[3,4]</sup>。

网络分区的核心概念是将复杂的电力配送网络划分为几个具有稳定电压特性的控制区域<sup>[5]</sup>。目前,为了解决复杂系统中区域电压控制的问题,通常采用启发式算法<sup>[6]</sup>、聚类算法<sup>[7,8]</sup>以及复杂网络理论<sup>[9]</sup>等方法进行电压分区。为了更好地满足实际复杂电网对电压控制的要求,提高配电网安全稳定性,文献[10]提出了电压支撑能力指标,采用模块度分区函数对配电网进行分区。该方法没有充分考虑到设备之间的并行优化问题,导致在协调控制方面存在一定的不足。

针对现有配电网的电压控制研究可以从分布式协调控制、集中式整体控制以及多时间尺度精细化控制 3 个方面展开。分布式协调控制通过将

目标函数分解为多个参与节点各自的任务,实现任务分配和局部决策<sup>[11]</sup>。然而此方法存在整体协调控制和算法收敛问题。集中式整体控制基于配电网全局信息进行控制,对于单目标优化模型,通常可以快速求解。但是对于多目标非线性优化模型,为了获得较高的求解效率,须要将非凸问题转化为凸优化问题<sup>[12,13]</sup>。文献[14,15]提出使用混合整数二阶锥规划来协调各种调压设备进行有功-无功功率多目标协调优化,实现了问题的快速、准确求解。多时间尺度精细化控制通常将机械式调压设备和电力电子式调压设备建模为长时间尺度和短时间尺度的优化问题<sup>[16]</sup>。文献[17,18]中提出了配电网分层协调控制策略,对于不同的配电网环境采集到的信息采用不同的控制方法和策略,实现了调压设备的快速响应。上述控制方法主要采用了基于精确的物理模型进行验证和优化的策略。为了实时获取实际运行参数,引入强化学习算法,可摆脱对精确物理模型的依赖<sup>[19,20]</sup>,实现不同设备的协同优化。

综上,充分调用多种可控资源进行分区电压控制具有重要意义。本文提出了考虑网络分区的含高比例分布式光伏配电网电压协调控制。根据

收稿日期: 2024-03-29。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173188)。

作者简介: 嵇岩(1982-),男,工程师,主要从事增量配电网运维和调度管理工作。E-mail: ligx2012@126.com

现有电网拓扑结构的类型和节点电压灵敏度的特性,将配电网划分为集中拓扑和局部拓扑,将机械式设备(有载调压变压器 OLTC)、电容器组 SC 与电力电子式设备(光伏逆变器、静止无功补偿器 SVC、储能电池系统 ESS)分别用于集中拓扑和局部拓扑中。在集中拓扑中采用混合整数二阶锥规划方法,以最小化电压偏差和网损之和作为目标函数建立模型,进行日内小时层调度;在局部拓扑中采用深度确定性梯度算法,以节点电压偏差最小为目标函数进行实时控制。最后,以某实际 35 kV/10 kV 有源配电网,验证了本文所提出的方法和划分模型的精度具有较高的可信性。

### 1 有源配电网电压控制策略框架

在有源配电网中,为合理划分各设备的调压区域,本文提出基于分区协调控制的有源配电网电压优化运行策略的总体框架,如图 1 所示。

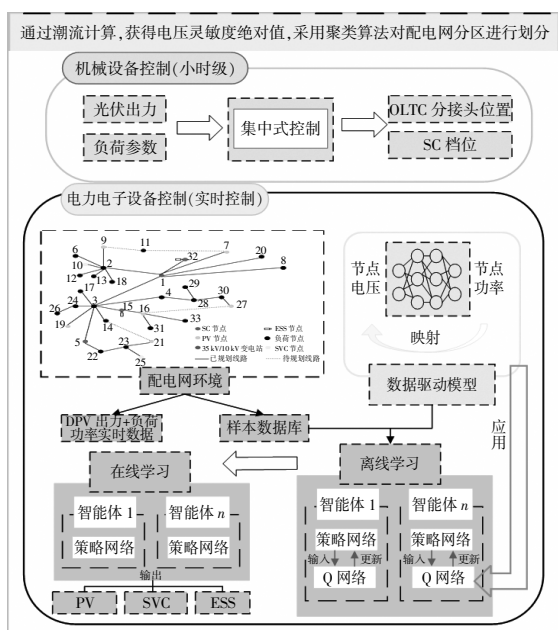


图 1 分区电压协调控制策略框架

Fig.1 Partitioned voltage coordinated control strategy framework

如图 1 所示,本文所提出的控制策略基于配电网网络分区概念展开。第一层考虑了分布式光伏发电和负荷参数,并通过集中调节 OLTC 和 SC 来保证整体电压的稳定性;第二层考虑了配电网的潮流数据信息,通过控制光伏逆变器、SVC 和 ESS 的输出来调节节点功率,利用电压和功率之间的映射关系改变节点电压。在深度学习的过程中,将每个调节设备设置为独立的智能体。在离

线学习阶段,利用历史配电网样本数据训练深度学习模型。在线学习阶段,当节点电压发生偏差时,设备智能体根据离线学习训练后的模型进行训练,输出相应的功率,以应对电压偏差问题。

### 2 配电网网络分区方法

#### 2.1 电压灵敏度计算

受到系统内线路参数、网络拓扑等因素的综合影响,某些节点的电压灵敏度值可能比其他节点的大,这些节点通常被认为是系统中最脆弱的节点。电压灵敏度矩阵  $S$  可以通过  $n$  节点的雅克比矩阵计算得到,计算式为

$$S=J^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P_1+jQ_1 \\ P_2+jQ_2 \\ \vdots \\ P_i+jQ_i \\ \vdots \\ P_n+jQ_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $J$  为潮流的雅克比矩阵<sup>[8]</sup>;  $P_i, Q_i$  分别为第  $i$  个节点的有功和无功注入功率。

#### 2.2 控制区域划分方法

设有  $g$  个节点接入分布式电源,求解某一分布式电源  $PV_j$  注入的无功功率对  $n$  个节点电压控制的灵敏度绝对值,可以得到:

$$S_{ij} = \left( \frac{\partial U_1}{\partial Q_{PV_j}}, \frac{\partial U_2}{\partial Q_{PV_j}}, \dots, \frac{\partial U_i}{\partial Q_{PV_j}}, \dots, \frac{\partial U_n}{\partial Q_{PV_j}} \right), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $U_i$  为节点  $i$  的实际电压; $Q_{PV_j}$  为分布式光伏  $PV_j$  输出的无功功率。

第  $i$  个节点电压的变化量  $\Delta V_i$  与分布式电源输出功率的关系可以表示为

$$\Delta V_i = \sum_{j=1}^g S_{ij} P_{PV_j}, i=j \quad (3)$$

式中: $P_{PV_j}$  为节点  $j$  分布式光伏的输出功率。

本文采用改进 K-means 聚类算法对该模型进行求解,将核函数引入 K-means 的迭代过程,替代原始特征空间中的点积。设置  $C$  为集群空间的维数; $a_k$  和  $b_k$  为  $k$  维的向量,用于表示第  $k$  个属性;样本为  $x_i$ ;聚类中心为  $c_j$ 。具体求解步骤如下。

①输入参数:训练样本  $N$ 、训练回合数  $T$ 、定核函数参数  $\sigma$ 。

②计算欧式距离:

$$D(a,b)=\sqrt{\sum_{k=1}^C (a_k-b_k)^2} \quad (4)$$

计算核函数相似度:

$$S(i,j)=K(x_i,c_j)=\exp\left[-\frac{D(a,b)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

③设置循环条件:For actor=1,2,...,T。

④分配样本到簇:

$$r_{ij}=\begin{cases} 1 & \text{if } j=\arg \max_k S(i,k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

⑤更新聚类中心:

$$c_j=\frac{\sum_{i=1}^N r_{ij} \cdot K(x_i,c_j)}{\sum_{i=1}^N r_{ij}} \quad (7)$$

⑥返回最终的聚类结果。

### 3 有源配电网电压协调控制

在有源配电网中,当电压发生偏差时,首先采用集中式电压控制。然而,由于集中式电压控制所使用的设备为离散设备,无法进行连续精细的电压调节,导致部分节点的电压无法有效地控制在安全范围内。针对这些无法通过集中式控制调节的节点,采用分布式电压控制。在分布式电压控制中,参与控制的设备为连续控制设备,能够实现精准的电压控制,确保节点电压在安全范围内。

#### 3.1 基于二阶锥规划的集中电压控制策略

##### 3.1.1 目标函数

针对集中拓扑,以电压偏差与网损之和最小为目标函数:

$$\min F(x)=\sum_{i \in N_{\text{bus}}} \sum_{j \in c(i)} r_{ij} I_{ij}^2 + \sum_{i \in N_{\text{bus}}} (V_i - V_0)^2 \quad (8)$$

式中: $N_{\text{bus}}$ 为配电网的节点数; $c(i)$ 为电网中与节点*i*相邻的电网集合; $r_{ij}$ 为支路*i,j*之间的电阻; $I_{ij}$ 为电流的平方值; $V_i$ 为节点*i*的电压幅值; $V_0$ 为节点的基准电压, $V_0=1.0$  p.u。

式(8)中,等式右边第一项为网损,第二项为电压偏差,显然第二项是线性的,本文命  $V_i^2 = \sqrt{2} U_{i0}$

##### 3.1.2 约束条件

①支路潮流约束

$$\begin{cases} P_{PV,i}(t) - P_{Load,i}(t) = \\ V_i(t) \sum_{j \in i} V_j(t) [G_{ij} \cos \theta_{ij}(t) + B_{ij} \sin \theta_{ij}(t)] \\ N_{SC,i}(t) b_i V_i^2(t) + Q_{PV,i}(t) - Q_{Load,i}(t) = \\ V_i(t) \sum_{j \in i} V_j(t) [B_{ij} \cos \theta_{ij}(t) - G_{ij} \sin \theta_{ij}(t)] \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{PV,i}(t)$ , $Q_{PV,i}(t)$ 分别为节点*i*上分布式光伏的实际有功、无功输出; $V_i(t)$ , $V_j(t)$ 分别为节点*i,j*的实际电压值; $P_{Load,i}(t)$ , $Q_{Load,i}(t)$ 为节点*i*在*t*时刻的负荷量; $B_{ij}$ , $G_{ij}$ 分别为节点*i,j*之间的线路电纳、电导; $N_{SC,i}$ 为分组投切电容器组*i*的投切组数; $b_i$ 为一组电容器的阻抗; $\theta_{ij}(t)$ 为电压在*t*时刻的相角。

利用支路潮流方程,将配电网系统的有效具体数学模型转换为混合整数二阶锥优化模型,定义为

$$\begin{cases} V_i V_j \cos \theta_{ij} = T_{ij} = T_{ji} \\ V_i V_j \sin \theta_{ij} = W_{ij} = -W_{ji} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $T_{ij}$ 和 $W_{ij}$ 为电网中的支路。

将支路潮流方程改写为

$$\begin{cases} P_{PV,i}(t) - P_{Load,i}(t) = \\ \sqrt{2} G_{ii} U_i(t) + \sum_{j \in ij \neq i} [G_{ij} T_{ij}(t) + B_{ij} W_{ij}(t)] \\ N_{SC,i}(t) b_i V_i^2(t) + Q_{PV,i}(t) - Q_{Load,i}(t) = \\ \sqrt{2} B_{ii} U_i(t) + V_i(t) \sum_{j \in ij \neq i} [B_{ij} T_{ij}(t) - G_{ij} W_{ij}(t)] \end{cases} \quad (11)$$

②OLTC约束

$$\begin{cases} V_j(t) = V_j(t-1) + \Delta t_{OLTC}^d V_{\Delta b_{OLTC}} \\ t_{OLTC}^{d \cdot \min} \leq \Delta t_{OLTC}^d \leq t_{OLTC}^{d \cdot \max} \\ |x_{OLTC}^d(t) - x_{OLTC}^d(t-1)| \leq \Delta x_{OLTC}^{d \cdot \max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $t_{OLTC}^{d \cdot \min}$ , $t_{OLTC}^{d \cdot \max}$ 分别为OCTL变比的最小、最大档位; $\Delta t_{OLTC}^d$ 为档位的变化量; $V_{\Delta b_{OLTC}}$ 为变化一个档位调节的电压量; $x_{OLTC}^d$ 为OCTL的档位; $x_{OLTC}^{d \cdot \max}$ 为OLTC允许的最大档位变化量。

式(12)中第3个式子是非线性的,为了确保OLTC输出的连续性,引入额外的辅助变量  $x_{OLTC}^{\text{pref}}(t-1)$ 来表示前一个时间的OLTC的电压可调节量,得到:

$$\begin{cases} x_{\text{OLTC}}^{\text{pref}}(t) - x_{\text{OLTC}}^{\text{pref}}(t-1) = x_{\text{OLTC}}^d(t) \\ x_{\text{OLTC}}^d(t) \leq \Delta x_{\text{OLTC}}^{d \cdot \max} \\ x_{\text{OLTC}}^d(t) \geq -\Delta x_{\text{OLTC}}^{d \cdot \max} \end{cases} \quad (13)$$

③SC 约束

$$\begin{cases} Q_{j,\text{dis}}^{\text{SC}} = Y_{j,t}^{\text{SC}} Q_j^{\text{SC,step}} \\ Y_j^{\text{SC,min}} < Y_{j,t}^{\text{SC}} \leq Y_j^{\text{SC,max}} \quad \forall t, \forall j \in N^{\text{SC}} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $Q_{j,\text{dis}}^{\text{SC}}$  为投运 SC 可提供的补偿功率； $Y_{j,t}^{\text{SC}}$  为 SC 的运行组数； $Q_j^{\text{SC,step}}$  为每组 SC 可补偿的功率量； $N^{\text{SC}}$  为 SC 的节点集合； $Y_j^{\text{SC,max}}$ ， $Y_j^{\text{SC,min}}$  分别为节点  $j$  上 SC 数量的上、下限值。

④电压安全运行约束

$$V_i^{\min} < V_i(t) < V_i^{\max} \quad (15)$$

式中： $V_i^{\max}$ ， $V_i^{\min}$  分别为节点  $i$  的电压上、下限，此处取节点电压标么值 1.05 p.u. 和 0.95 p.u.。

上述模型使用商业求解器 CPLEX 进行求解。

3.2 基于强化学习的局部电压控制阶段

3.2.1 电压局部控制系统模型

在电压精细化控制模型中，将控制目标函数设置为节点电压越限值，即：

$$\min F_1(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} (V_i - 1.05V_0), V_i \geq 1.05V_0 \\ \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} (0.95V_0 - V_i), V_i \leq 0.95V_0 \end{cases} \quad (16)$$

精细化控制模型约束是在集中电压控制模型中的支路潮流约束、电压安全运行约束、光伏逆变器约束的基础上添加 ESS 约束和 SVC 约束。

①ESS 出力约束

$$\begin{cases} P_{i,\text{min}}^{\text{ESS}}(t) \leq P_i^{\text{ESS}}(t) \leq P_{i,\text{max}}^{\text{ESS}}(t) \\ \Delta P_{i,\text{min}}^{\text{ESS}}(t) \leq \Delta P_i^{\text{ESS}}(t) \leq \Delta P_{i,\text{max}}^{\text{ESS}}(t) \end{cases} \quad (17)$$

式中： $P_{i,\text{min}}^{\text{ESS}}(t)$ ， $P_{i,\text{max}}^{\text{ESS}}(t)$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  上储能输出有功的最小值、最大值； $\Delta P_{i,\text{min}}^{\text{ESS}}(t)$ ， $\Delta P_{i,\text{max}}^{\text{ESS}}(t)$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  上储能输出有功最小、最大变化量； $\Delta P_i^{\text{ESS}}(t)$  为  $t$  时刻节点  $i$  上储能系统输出有功变化量。

②SVC 出力约束

$$\begin{cases} Q_{i,\text{min}}^{\text{SVC}}(t) \leq Q_i^{\text{SVC}}(t) \leq Q_{i,\text{max}}^{\text{SVC}}(t) \\ \Delta Q_{i,\text{min}}^{\text{SVC}}(t) \leq \Delta Q_i^{\text{SVC}}(t) \leq \Delta Q_{i,\text{max}}^{\text{SVC}}(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中： $Q_{i,\text{max}}^{\text{SVC}}(t)$ ， $Q_{i,\text{min}}^{\text{SVC}}(t)$  分别为  $t$  时刻 SVC 在节点  $i$  上允许输出无功上、下限值； $\Delta Q_{i,\text{max}}^{\text{SVC}}(t)$ ， $\Delta Q_{i,\text{min}}^{\text{SVC}}(t)$  分别为  $t$  时刻 SVC 在节点  $i$  上允许输出无功变化量的上、下限值； $\Delta Q_i^{\text{SVC}}(t)$  为  $t$  时刻 SVC 在节点  $i$  上的输出无功变化量。

③光伏逆变器约束

$$\begin{cases} P_{\text{PV}}^{\min} \leq P_{\text{PV},i}(t) \leq P_{\text{PV}}^{\max} \\ P_{\text{PV},i}^2(t) + Q_{\text{PV},i}^2(t) \leq S_{\text{inv}}^2 \end{cases} \quad (19)$$

式中： $P_{\text{PV}}^{\max}$ ， $P_{\text{PV}}^{\min}$  分别为光伏逆变器输出有功的上、下限值； $S_{\text{inv}}^2$  为逆变器的容量。

3.2.2 多智能体马尔科夫博弈建模

本文将每个控制设备都视为一个独立的智能体，拥有自主调节配电网节点电压的能力，提高系统的灵活性和效率。这些智能体之间可以相互交流环境信息，实现实时的离线、在线学习，及时响应电压偏差。此外，强化学习无须事先对系统进行复杂的建模，能够直接从数据中学习非线性动态特性，保证了电网运行的稳定性和可靠性，同时提高了控制的精准度和适应能力。具体来说，研究内容包括以下几个方面。

①状态集： $s_i^i \in S_i$ ，获取配电网节点  $i$  处的潮流信息，便于后续数据处理。 $S_i$  为采集的潮流信息集合， $S_i$  表示为

$$[v_1, \dots, v_i, \dots, v_{N_{\text{bus}}}, p_1, \dots, p_i, \dots, p_{N_{\text{bus}}}, q_1, \dots, q_i, \dots, q_{N_{\text{bus}}}], 1 \leq i \leq N_{\text{bus}} \quad (20)$$

式中： $v_i$ ， $p_i$ ， $q_i$  分别为配电网系统节点  $i$  的电压值、有功功率值、无功功率值。

②动作集： $a_i^i \in A_i$ ，表示在时刻  $t$  配电网的节点  $i$  处面对电压波动后采取的动作策略。 $A_i$  为所有智能体动作集合， $A_i$  定义为 PV，ESS 和 SVC 组合的出力集合：

$$[P_{\text{PV}}, Q_{\text{PV}}, P_{\text{ESS}}, Q_{\text{SVC}}] \quad (21)$$

式中： $P_{\text{PV}}$ ， $Q_{\text{PV}}$  分别为光伏系统的有功、无功出力； $P_{\text{ESS}}$  为储能电池的充、放电功率； $Q_{\text{SVC}}$  为 SVC 的无功出力。

③奖励函数:  $r_t^i \in R_t$ , 表示在时刻  $t$  智能体在配电网的节点  $i$  处采取了奖励值。  $R_t$  为所有智能体奖励集合, 具体为控制变量和值函数网络集合:

$$\begin{bmatrix} -\Delta v_{i_v} \cdot B_1 \cdot \Delta v_{i_v}^T - \Delta P_{i_{pv}}^{PV} \cdot C_1 \cdot \Delta P_{i_{pv}}^{PV^T} \\ -\Delta Q_{i_{pv}}^{PV} \cdot C_2 \cdot \Delta Q_{i_{pv}}^{PV^T} - \Delta P_{i_{es}}^{ES} \cdot D_1 \cdot \Delta P_{i_{es}}^{ES^T} \\ -\Delta Q_{i_{svc}}^{SVC} \cdot E_1 \cdot \Delta Q_{i_{svc}}^{SVC^T} \end{bmatrix}, \forall i_{pv} \in N_{PV},$$

$$\forall i_{es} \in N_{ES}, \forall i_{svc} \in N_{SVC} \quad (22)$$

式中:  $\Delta v_{i_v}$  为母线节点  $i$  的电压标么值的越限值;  $\Delta P_{i_{pv}}^{PV}$ ,  $\Delta Q_{i_{pv}}^{PV}$  分别为母线节点  $i$  上的光伏装置出力有功变化量、输出无功变化量;  $\Delta P_{i_{es}}^{ES}$ ,  $\Delta Q_{i_{es}}^{SVC}$  分别为母线节点  $i$  上的ES输出有功、无功变化量;  $N_{PV}$ ,  $N_{ES}$  和  $N_{SVC}$  分别为该区域内的分布式光伏、储能和 SVC 的数量;  $B_1$  为电压偏差项的惩罚系数, 用于控制电压偏差的大小;  $C_1, C_2$  分别为分布式光伏输出有功、无功调节量项的惩罚系数, 用于控制分布式光伏的输出功率;  $D_1$  为储能输出有功调节量项的惩罚系数, 用于控制储能系统的输出功率;  $E_1$  为 SVC 输出无功调节量项的惩罚系数, 用于控制 SVC 的输出功率。

马尔科夫决策过程描述: 在马尔科夫决策过程中, 寻找最佳策略以使累积折扣奖励最大化。本文表达为最大化累积折扣奖励的目标方程:

$$V^{(s_t^i)} = \max_a \left[ R(s_t^i, a_t^i) + \gamma \sum_{s_t^{i'}} P(s_t^{i'} | s_t^i, a_t^i) V^{(s_t^{i'})} \right] \quad (23)$$

式中:  $V^{(s_t^i)}$  为在状态  $s_t^i$  下通过最优策略所能获得的期望累计折扣奖励;  $R(s_t^i, a_t^i)$  为在状态  $s_t^i$  下采取动作  $a_t^i$  所得到的即时奖励;  $P(s_t^{i'} | s_t^i, a_t^i)$  为经过采取动作  $a_t^i$  从状态  $s_t^i$  转移到状态  $s_t^{i'}$  的概率;  $\gamma$  为折扣因子, 用于评估和比较不同策略的性能, 并找到能够达到最大累计折扣奖励的最优策略。

### 3.2.3 模型训练与求解

本文所采用的深度确定性策略梯度算法 (Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG) 可用于有效地解决电压精细化控制数学模型中的优化问题, 具体步骤如下。

①为了稳定训练, 引入目标值函数网络, 计算目标值  $Q'(s_t^i, a_t^i)$ :

$$Q'(s_t^i, a_t^i) = r_t^i + \gamma Q[s_t^{i'}, \delta(s_t^i)] \quad (24)$$

式中:  $\delta$  为目标策略函数。

②使用均方误差作为损失函数更新值函数网络:

$$L(\theta^Q) = \frac{1}{N} \sum_i [Q(s_i, a_i) - y_i]^2 \quad (25)$$

式中:  $N$  为批量样本的大小;  $s_i, a_i$  为经验回放缓冲区中的样本;  $y_i$  为目标值。

③通过最大化策略梯度更新策略函数网络:

$$\nabla_{\theta^J} J \approx \frac{1}{N} \sum_i \nabla_a Q(s_i, a_i | \theta^Q) | s \quad (26)$$

式中:  $\nabla_{\theta^J} J$  为策略梯度;  $Q(s_i, a_i | \theta^Q)$  为值函数相对于动作的梯度。

④通过梯度下降法更新值函数网络和策略函数网络的参数:

$$\theta^Q \leftarrow \theta^Q - \alpha \theta^Q \leftarrow -\theta^Q + \beta \nabla_{\theta^J} J \quad (27)$$

式中:  $\alpha, \beta$  为学习率参数, 用于控制参数更新的幅度。

⑤为了提高算法的稳定性, 采用 soft 更新方法来更新目标值函数网络和策略函数网络的参数:

$$\theta^Q \leftarrow \tau \theta^Q + (1 - \tau) \theta^Q \leftarrow -\tau \theta^Q + (1 - \tau) \theta^Q \quad (28)$$

式中:  $\tau$  为软更新得到的系数, 用于控制更新的幅度。

## 4 算例

为了验证上述理论的有效性, 本文选取某实际 35 kV/10 kV 配电网进行仿真验证, 节点线路待规划配电网的地理拓扑如图 2 所示<sup>[21]</sup>。

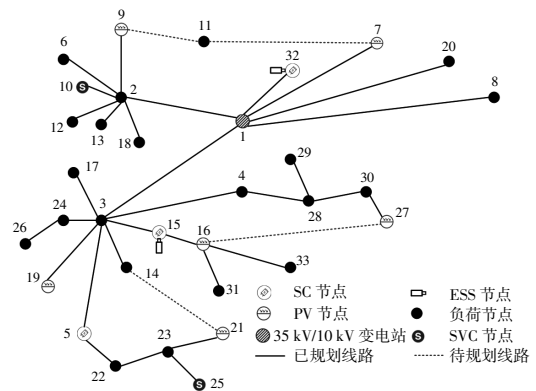


图 2 实际电路地理拓扑

Fig.2 Geographical topology of actual circuit

为了体现新能源的渗透率, 在配电网系统节点 7, 9, 16, 19, 21, 27 分别接入 1 MW 的光伏机

组;在节点 1 接入具有 12 档位的有载调压变压器;同时,在节点 15 和 32 接入容量为 0.8 MW·h 的 ESS;在节点 5,15 和 32 分别接入容量为 0.15 Mvar 的 SC;在节点 10 和 25 接入容量为 0.5 Mvar 的 SVC。

4.1 分区结果分析

首先计算系统潮流的雅克比矩阵,得到各节点的电压分布和灵敏度情况,如图 3 所示。

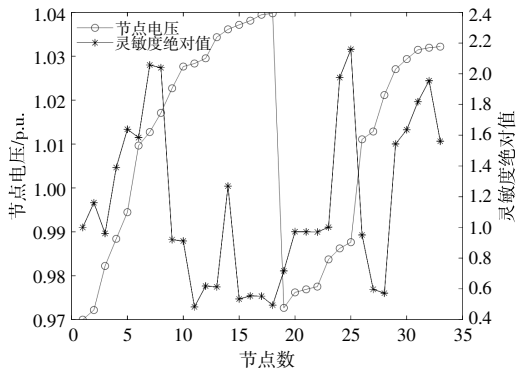
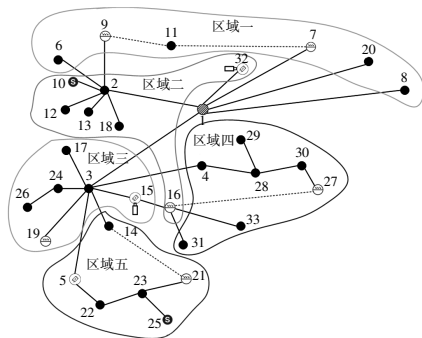


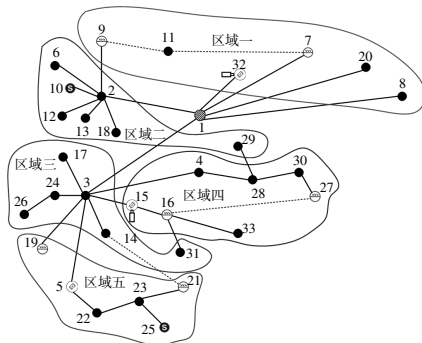
图 3 各个节点的电压/灵敏度

Fig.3 Voltage/sensitivity of each node

根据 K-means 算法,取聚类数  $k=5$ ,即为 5 个子类,得到的聚类分区结果如图 4(a)所示,基于文献[7]划分方法的分区结果如图 4(b)所示。



(a)本文方法分区结果



(b)文献[7]分区结果

图 4 分区结果对比

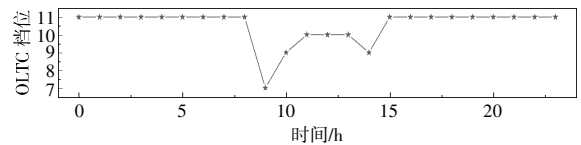
Fig.4 Comparison of partition results

由图 4 可知,基于文献[7]划分方法中,灵敏度绝对值较高的节点集中在区域一和区域三,出现了无调节设备存在的区域,造成大量资源浪费。本文所提出的分区方法,使划分出的节点数量及调节设备量更加均衡,可以更容易地进行区域控制和管理。

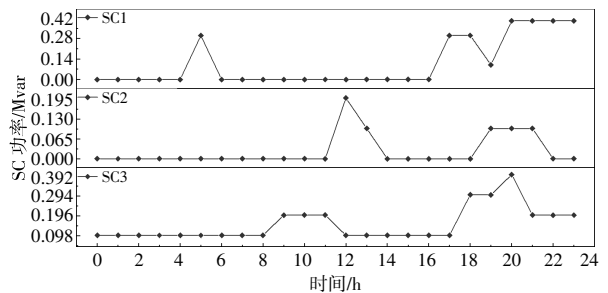
4.2 协调控制分析结果

①集中控制

根据图 5 所示,典型日内集中控制 OLTC 与 SC 的具体动作:OLTC 在午时阳光充足的情况下调整动作 5 次;SC1 在上、下班高峰时刻调整动作 5 次;SC2,SC3 为应对负荷功率的波动均调整动作 5 次。



(a)OLTC 控制结果



(b)SC 控制结果

图 5 OLTC 与 SC 动作情况

Fig.5 OLTC and SC actions

②电压精细化控制

本文使用了智能体强化学习的方法,将每个 DPV,SVC 和 ESS 都作为独立的智能体进行建模。每个智能体包含两个神经网络:一个是由两层含有 100 个神经元的隐藏层组成的动作网络;另一个是数据驱动的基于卷积神经网络构建的评价网络。该方案中,设置智能体容量为 1 000,学习率为 0.01,折扣因子为 0.1。智能体训练如图 6 所示。

由图 6 可知,在 600 轮回时训练平均奖励值、平均  $Q$  值已收敛于 21 和 5 范围内,可以判定该算法已经成功训练出了电压控制策略,意味着在使用电压控制后,节点电压已经稳定在安全范围内。

为了突出所提分区协调控制的优势,本文构

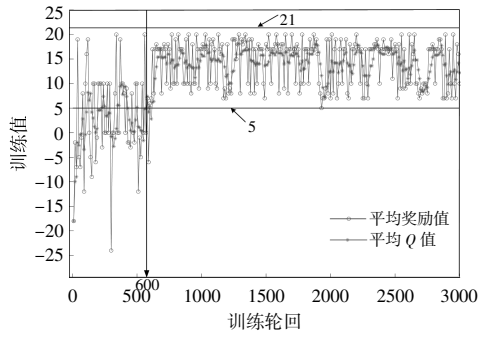


图6 智能体训练

Fig.6 Agent training diagram

建了3种协调控制方案:方案1,未实施任何控制策略;方案2,在本文所提的分区方法后实施第一阶段集中式控制策略;方案3,基于文献[7]划分结果,采用传统集中式控制。

对比方案和本文提出电压控制策略的性能结果如表1所示。

表1 4种不同控制策略在测试集中的性能

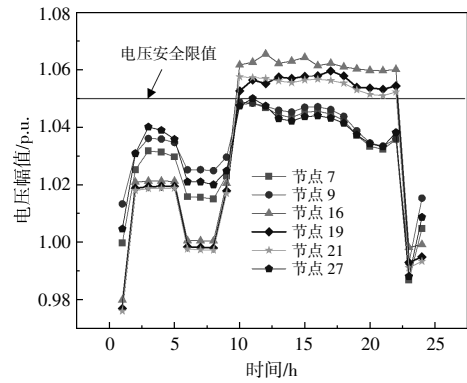
Table 2 Performance of four different control strategies in the test set

控制策略	方案1	方案2	方案3	本文所提策略
平均电压偏差/%	1.88	0.45	0.21	0.15
最大电压偏差/%	7.51	4.10	3.99	3.51
支路总网损/MW	0.056	0.035	0.021	0.025
响应时间/s	4.84	2.36	10.15	0.19

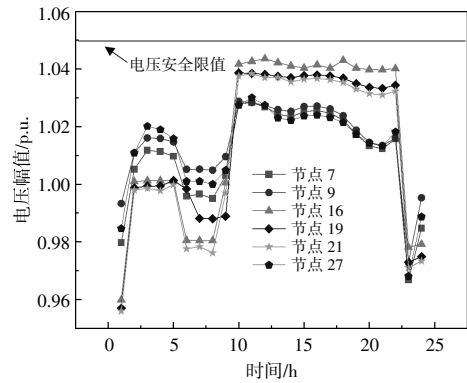
由表2可知:相较于其他3种方案,本文所提策略的平均电压偏差分别降低了1.73%,0.30%,0.06%,最大电压偏差分别降低了4.00%,0.59%,0.48%;相较于方案1和方案2,本文所提策略的支路网损分别降低了0.031 MW,0.010 MW。方案3因调压设备较为集中,导致不同区域的线路损耗不均匀,容易造成局部线路故障。鉴于传统的集中式控制在处理光伏出力频繁波动时面临计算数据庞大和通信延迟等问题,本文所提出的分区电压控制策略具备实时性。

为验证局部电压控制可以弥补集中控制的不足,记录方案2与本文所提策略部分节点24h内的电压偏差值,如图7所示。

由图7可知:方案2由于缺少局部电压控制,整体电压幅值水平增高,在10:00-20:00,节点16,19,21的电压幅值越过电压安全上限值,进一步加剧了潜在的风险;本文所提策略可以有效保证配电网中各个节点电压均控制在安全运行范围内。



(a)方案2



(b)本文所提策略

图7 节点电压幅值对比

Fig.7 Node voltage amplitude comparison diagram

为了进一步说明本文所提策略的优越性,在本文设置的仿真环境下设置近端策略优化算法(PPO)和置信域策略优化算法(TRPO),与本文所提的策略进行比较,不同策略控制结果如表2所示。

表2 不同策略控制结果

Table 2 Control results of different strategies

策略	优化前	本文策略	PPO	TRPO
响应时间/s	0	0.25	1.26	1.06
平均电压偏差量/p.u.	0.089 0	0.004 1	0.016 0	0.002 6

由表2可知,相较于其他策略,本文策略在处理电压控制问题时因采用了离线学习环境,能够更快地做出反应,从而减少了响应时间。此外,本文采用了独立的智能体,能够自主判断输出量,显著降低了电压偏差。综上所述,本文提出的策略能够有效应对电压偏差对配电网的影响。

## 5 结论

针对含高比例分布式光伏配电网内不同时间响应的设备调压特性和高维度下电压难以控制等

问题,本文考虑网络分区的含高比例分布式光伏配电网电压协调控制,具体结论如下。

①通过对所有节点的电压灵敏度进行计算,可以直观地呈现系统中存在的电压薄弱点,利用改进后的 K-means 算法进行聚类,实现了对现有配电网的合理分区。

②通过转换,将多目标优化问题限制在具有闭凸锥范围的混合整数二阶锥模型中,以确保最优解的可行性,并进一步提高了问题求解的效率。

③引入深度确定性梯度算法,将大量计算部署于模型训练阶段,从而能够制定灵活的调整策略来应对电压波动所带来的影响,并且可以提高智能体之间的协同性。

#### 参考文献:

- [1] 惠慧,李蕊,朱逸楠,等.含高比例分布式光伏的配电网多目标概率规划方法[J].电测与仪表,2023,60(11):2-10.
- [2] 郑许林,袁源,柏晶晶,等.分布式光伏无功电压主动支撑控制方法[J].可再生能源,2023,41(12):1685-1690.
- [3] Sun Xianzhuo, Qiu Jing, Zhao Junhua. Real-time volt/var control in active distribution networks with data-driven partition method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3):2448-2461.
- [4] 谢立君,汪超.基于局部测量的含分布式光伏县域配电网分区电压控制[J].电测与仪表,2023,60(12):153-158.
- [5] 李英量,王康,高兆迪,等.基于综合灵敏度的两阶段电压控制分区方法[J].科学技术与工程,2022,22(6):2284-2290.
- [6] 马启鹏,郝正航,张裕,等.含高渗透率分布式光伏配电网的网络分区与电压协调控制[J].电网与清洁能源,2023,39(3):93-102,108.
- [7] 任鑫,王华,王忠超,等.基于聚类分区的风电场无功电压优化控制策略[J].科学技术与工程,2022,22(34):15154-15162.
- [8] 郭沛,王利利,李猛,等.基于灵敏度聚类的含 DG 配电网电压分区控制方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(6):100-107.
- [9] 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.
- [10] 李赫,谭为先,王振浩.基于改进模块度函数分区的光伏地区电压协调控制研究[J].电工技术,2022(8):56-61,82.
- [11] 孙永辉,赵树野,张秀路,等.考虑分布式光伏与储能联合的区域电网电压稳定性控制方法[J].可再生能源,2022,40(8):1115-1122.
- [12] 刘杨华,杨悦荣,林舜江.含光伏配电网中储能和无功补偿装置协调的多目标凸优化配置方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(5):22-33.
- [13] 晨辉,黄哲,孟凡成,等.基于两阶段优化的主动配电网有功无功协调调度方法[J].可再生能源,2019,37(1):71-78.
- [14] 乐健,周谦,赵联港,等.基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J].电力自动化设备,2020,40(3):44-54.
- [15] 刘星,陈众,陈李杰,等.含高渗透率光伏的配电网就地-分布式电压控制[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(6):268-275.
- [16] 蔡永翔,杨安黔,付宇,等.面向分布式光伏并网和电能替代的低压配电网自适应控制[J].可再生能源,2023,41(10):1343-1351.
- [17] 曹迪.主动配电网电压控制策略研究[D].成都:电子科技大学,2021.8-10.
- [18] Zhang C, Xu Y. Hierarchically-coordinated voltage/var control of distribution networks using PV inverters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4):2942-2953.
- [19] Sun X, Qiu J. Two-stage volt/var control in active distribution networks with multi-agent deep reinforcement learning method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4):2903-2912.
- [20] 倪爽,崔承刚,杨宁,等.基于深度强化学习的配电网多时间尺度在线无功优化[J].电力系统自动化,2021,45(10):77-85.
- [21] 石博,肖传亮,彭克,等.基于集群划分的配电网网源-储双层联合扩展规划策略[J].电力系统自动化,2023,47(14):43-51.

## Voltage coordinated control of distribution network with high proportion distribution photovoltaic considering network partition

Ji Yan<sup>1</sup>, Yang Dandan<sup>1</sup>, Zhou Zhengdong<sup>1</sup>, Lu Yucheng<sup>1</sup>, Jing Zhichuan<sup>1</sup>, Ma Xiaonan<sup>2</sup>

(1.Jiangsu Donggang Energy Investment Co.,Ltd., Lianyungang 222042, China; 2.College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210032, China)

**Abstract:** Due to the high proportion of distributed photovoltaic access to the distribution network, the traditional centralized control is difficult to adapt to the voltage control problem in high-dimensional environment. Therefore, this paper proposes a voltage coordinated control of photovoltaic distribution network with high proportion distribution considering network partition. Firstly, the distribution network is divided into centralized topology and local topology according to the partition function algorithm. Secondly, aiming at the centralized topology, the voltage centralized control model of distribution network based on second order cone programming (SOCP) is established with the minimum sum of voltage deviation and network loss as the objective function. Aiming at the local topology, the minimum node voltage deviation is taken as the objective function, and the voltage fine control model with Markov decision process is established. Then, the CPLEX solver and the deep deterministic gradient algorithm are used to solve the regional model effectively. Finally, the method is applied to an actual 35 kV/10 kV distribution network. The simulation results show that the proposed method has a good control effect, which ensures the safe operation of the distribution network and improves the photovoltaic penetration rate.

**Keywords:** distribution network; distribution photovoltaic; voltage coordinated control; network partition