

计及量测终端通信延迟的主动配电网准实时无功-电压控制

穆煜¹,徐俊俊¹,张腾飞¹,张卉琳²,吴巨爱¹

(1. 南京邮电大学 自动化学院,江苏 南京 210023;2. 国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 211106)

摘要:大量分布式电源及智能量测终端接入配电网引发的数据与通信量增加,导致传统集中式电压控制响应迟滞,加剧电压波动。为此,提出一种计及终端通信延迟的主动配电网准实时无功-电压控制方法。基于网络拓扑映射部署边缘节点,利用边缘计算对配电网潮流进行前推回代分析,完成功率流、电压及线损的局部计算与分布式管理。在准实时监测光伏节点电压的基础上,协同光伏构建基于边缘节点的下垂式电压控制策略。针对通信延迟带来的控制步长异步问题,引入改进的一致性算法实现数据同步。算例仿真结果表明,所提方法在指令响应时效方面具有一定优势,能够有效解决光伏接入引发的节点电压波动问题,提升主动配电网运行与调控的稳定性与可靠性。

关键词:主动配电网;分布式光伏;电压控制;通信延迟;边缘计算;无功优化

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202511023

0 引言

在“双碳”目标的引领下,光伏、风电等分布式电源的大规模接入有效缓解了传统配电网的供需矛盾^[1]。然而,分布式电源的间歇性出力特性显著加剧了配电网馈线节点的电压波动^[2]。为应对分布式资源渗透引发的运行不稳定问题,通过引入智能电子设备(intelligent electronic device, IED)与信息通信技术(information communication technology, ICT),主动配电网实现了对电网状态的动态感知与精细控制^[3-4]。随着海量分布式电源的并网与IED的大量接入,配电网面临计算任务骤增与通信压力显著上升的问题,这既降低了IED对光伏节点的监测与控制效率,又加剧了电压波动。因此,亟需突破在分布式资源高渗透和IED广泛部署条件下的电压稳定控制关键技术^[5-6]。

主动配电网的电压控制方法主要包括数据驱动控制、模型预测控制(model predictive control, MPC)、集群划分控制等。文献[7]利用多源数据构建数据驱动的控制模型,解决了电压波动问题;文献[8]通过MPC方法修正了长期电压偏差;文献[9]提出双层微电网集群划分机制以降低通信负载。上述方法在一定程度上提高了配电网的电压控制精度,但大多依赖于集中式架构,面临通信延迟和控制滞后的挑战,特别是在通信网络存在时延的场景下,高光伏渗透率系统中的协同控制机制容易因响应不一致而失效,造成逆变器与传统设备之间动作不同步,

从而加剧电压波动,影响系统稳定性。文献[10]提出异步迭代、动态补偿与分层控制策略,提高了控制的鲁棒性与实时性;文献[11]提出一种基于交流故障检测和无功功率控制的抑制控制策略,能够有效抑制换流器故障,并加速直流恢复。文献[12]提出考虑荷电状态(state of charge, SOC)修正的鲁棒控制器,有效抑制了通信延迟对频率调节性能的影响。但这类方法大多基于中心化控制模型,难以应对随机通信时延和复杂网络拓扑变化。

随着局域能源市场中分布式能源的大量接入和电力系统运行方式的逐渐转变^[13],高比例光伏接入的电压控制策略逐渐强调分布式资源的本地调节能力,尤其是光伏逆变器的无功输出控制。文献[14]提出光伏逆变器自适应集群协调机制,无需系统模型即可实现动态电压支撑。文献[15-16]分别采用多智能体强化学习和鲁棒参数化函数,提升了无功功率的实时控制能力。文献[17]提出光储协调的多阶段电压控制策略,以应对电压越限问题。当光伏逆变器调节能力不足时,与传统有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)协同已成为重要方法。文献[18]设计电池储能系统与OLTC的联合调节方案。文献[19]则在OLTC自主运行的基础上引入协同决策控制,实现了过电压抑制与线损最小化。尽管这类方法提升了电压调节灵活性,但在海量数据处理与通信复杂的环境下,难以保证快速响应与稳定运行。

近年来研究者尝试引入边缘计算技术,使靠近设备的边缘节点承担部分数据处理和控制任务,在本地完成状态感知与控制决策,减轻主站负担,提升系统响应速度与可靠性。文献[20]提出基于边缘计算的模糊电压控制方法,有效降低了通信延迟造成的控制误差;文献[21]分析边缘计算设备与光伏逆

收稿日期:2025-01-18;修回日期:2025-09-03

在线出版日期:2025-11-25

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20232026)

Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20232026)

变器协同控制机制,加快了无功响应速度;文献[22]进一步提出实用化的边缘潮流算法,提升了计算效率。然而,现有研究大多聚焦于边缘计算的控制模型设计,尚缺乏对通信延迟下边缘节点任务交互机制的深入分析,且未充分考虑光伏出力波动导致的电压越限问题。

基于上述研究,本文针对高渗透率分布式光伏接入下传统集中式控制响应迟滞以及通信延迟导致的控制步长不同步等问题,提出一种计及量测终端通信延迟的主动配电网准实时无功-电压协同控制策略。基于配电网网络拓扑特性,设计边缘节点部署与任务分配机制,结合前推回代算法实现本地潮流、电压与线损的快速解析与管理;构建融合光伏逆变器无功调节能力与OLTC协同控制机制的边缘化协同电压控制模型,提升系统调压精度与协调性;面向通信延迟场景,引入改进一致性算法实现异步数据协同,并通过二阶锥规划(second-order cone programming, SOCP)方法优化控制步长设计,提高调控的鲁棒性与收敛效率;通过典型10 kV主动配电网算例开展仿真分析,验证所提方法在应对高渗透率光伏接入引起的电压波动以及提升调控实时性与系统稳定性方面的有效性与可行性。

1 基于边缘计算的前推回代潮流优化模型

通信延迟下边缘计算潮流电压控制框图如图1所示。控制框架分为网络层、物理层与控制层3层。网络层针对通信延迟问题进行优化,物理层进行潮流分析,控制层解决无功优化电压控制问题。

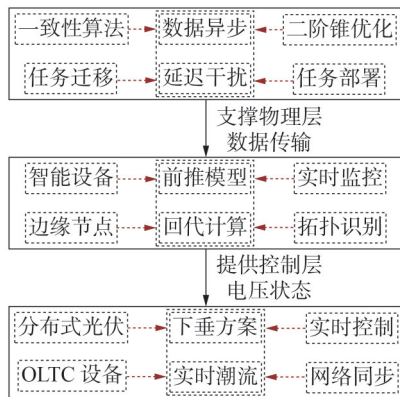


图1 通信延迟下边缘计算潮流电压控制框图

Fig.1 Block diagram of power flow voltage control in edge computing with communication delay

1.1 边缘节点的前推任务

将配有IED的节点指定为边缘节点,边缘节点具有电能计量、负荷控制及通信功能。边缘节点的选择需考虑通信范围和带宽限制:直接交换数据的节点间距不得超过最大通信距离,且每个节点监控的IED数量应在其通信容量范围内,以保证传输稳

定性和效率^[23]。

同时引入皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient, PCC)来衡量2个节点在高频波动上的同步性或相关性。首先,采用PCC衡量节点间电压变化的一致性,优先选取与其他节点高度相关的代表性节点。边缘节点的部署策略基于采用PCC来描述节点间的高相关性,PCC的计算公式为:

$$\gamma = \frac{\sum (V_i - \bar{V}_i)(V_j - \bar{V}_j)}{\sqrt{\sum (V_i - \bar{V}_i)^2} \sqrt{\sum (V_j - \bar{V}_j)^2}} \quad (1)$$

式中: γ 为PCC; V_i 、 V_j 分别为节点*i*和节点*j*的电压采样数据; $\bar{V}_i$ 、 $\bar{V}_j$ 为对应节点的电压均值。 $\gamma \in [-1, 1]$, $\gamma=1$ 表示完全正相关, $\gamma=-1$ 表示完全负相关, $\gamma=0$ 表示无线性相关, $|\gamma|>0.7$ 时相关性较高。

为弥补PCC在某些波动剧烈区域识别能力的不足,进一步引入电压异常灵敏度(voltage deviation sensitivity, VDS)指标来识别高波动节点,以增强系统的局部动态响应能力,用于补充PCC无法识别的边缘节点部署盲区。VDS定义为:

$$V_{VDS,i} = \frac{1}{T_{all}} \sum_{t=1}^{T_{all}} \left| \frac{dV_i^t}{dt} \right| \quad (2)$$

式中: $V_{VDS,i}$ 为节点*i*的VDS; T_{all} 为采样总时间步长; V_i^t 为*t*时刻节点*i*的电压。 $V_{VDS,i}$ 高的节点表示电压变化剧烈,建议设置边缘节点以增强局部动态响应能力。

监控区域内的子网潮流如图2所示。将配备IED的节点作为边缘节点*E(i)*,其监控区域可表示为 M_i 。为了方便说明,引入下列变量:节点*E(i)*的上游边缘节点为*E(k)*;不同边缘节点连接的支线节点为 $j_1-j_{n_1}$ 、 $m_1-m_{n_2}$ 、 $s_1-s_{n_2}$, n_1 、 n_2 分别为*E(i)*和*E(i+1)*监控区域内支线节点索引标识;边缘节点总数为 N_e 。每个边缘节点的本地子任务是负责各自监控区域内子网第*g*次迭代下的潮流计算,下游子任务是其下游节点监控区域内第*g-1*次迭代下的潮流计算。计算前的已知量包括:线路馈线的阻抗 Z_{ij} ;第*g-1*次迭代下的电网各节点电压 V_i^{g-1} 计算结果;当前第*g*次迭代下注入主动配电网的末端节点功率数据。计算任务是确定子网内馈线的功率流、线损与电压。

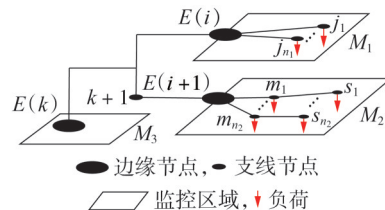


图2 监控区域内的子网潮流

Fig.2 Sub-network power flow within monitoring area

在第1种分区下,边缘节点划分的子区域内的监控区域中多条支线直接与边缘节点 $E(i)$ 相连,如图2中监控区域 M_1 所示,区域 M_1 内的节点编号集合 $\alpha=\{j_1, j_2, \dots, j_{n_1}\}$,与边缘节点相连的支线不包含额外的串联子支线,节点 j 的注入功率 $S_{\text{from_bus } j}=P_{\text{from_bus } j}+jQ_{\text{from_bus } j}(j \in \alpha)$ 。由各节点注入功率计算 $E(i)$ 的注入功率。 $E(i)$ 本地计算任务如附录A式(A1)所示。

在第2种分区下,边缘节点监控区域内的边缘节点 $E(i+1)$ 直接相连支线节点集合 $\beta=\{m_1, m_2, \dots, m_{n_2}\}$, β 中的节点串联子支线节点集合 $\mu=\{s_1, s_2, \dots, s_{n_2}\}$ 。由各末端节点计算 $E(i+1)$ 的注入功率,实现 $E(i+1)$ 边缘节点监控区域 M_2 的潮流。 $E(i+1)$ 本地计算任务如附录A式(A2)—(A9)所示。

下游节点将计算后得到的数据传输给其上游相邻的边缘节点。子区域前推模型如附录A图A1所示。当 $E(k)$ 接收到所有下游邻居边缘节点的数据后,根据附录A式(A10)、(A11),将边缘节点 $E(k)$ 计算得到的子网潮流各节点注入功率数据与线损数据 $X_{E(k)}$ 、 $Y_{E(k)}$ 作为边缘节点 $E(k)$ 的本地数据,进行其本地子任务的计算,并将计算得到的结果传输给 $E(k)$ 的上游邻居边缘节点。

1.2 边缘节点回代算法

在第 g 次迭代下,当所有下游边缘节点任务完成并将数据上传后,主站节点即处于当前计算链的最下游位置。此时主站提供第 g 次迭代下的电压值 V_i^g 来完成回代过程,即利用电压降落公式计算电网中所有节点的电压,如式(3)所示。

$$V_j^g = V_i^g - I_{ij}^g Z_{ij} \quad (3)$$

式中: V_j^g 为第 g 次迭代下线路末端节点 j 的电压向量; I_{ij}^g 为第 g 次迭代下流经线路 ij 的电流向量,可由前推过程中的功率流计算得到。

基于附录B式(B1)—(B3),由区域 M_4 内边缘节点 $E(k)$ 的计算任务得到的数据 $B_{E(k)}$ 可表示为:

$$B_{E(k)} = \begin{bmatrix} V_{E(k)}^g & V_k^g \\ V_{E(i)}^g & V_{k+1}^g \\ \vdots & \vdots \\ V_{E(N_e)}^g & V_{N_e}^g \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: V_k^g 为边缘节点监控区域内子网的非边缘节点支线节点 k 的电压向量,若支线不含节点 k ,则电压向量 V_k^g 为0。

$X_{E(k)}$ 、 $Y_{E(k)}$ 、 $B_{E(k)}$ 的矩阵列数对应边缘节点计算区域内线路支线的分支数。在 $E(k)$ 计算任务完成后,将计算结果传输给下游边缘节点。最下游的所有边缘节点完成计算为一次迭代过程结束,随后进行下一轮的迭代计算。边缘节点执行的前推回代潮流

计算任务是基于已知的上一步迭代数据和本地信息进行的,该过程不依赖于实时通信数据,因此不受通信延迟的影响。通信延迟会影响各边缘节点之间数据交互的同步性,进而可能间接影响整个网络的控制协调。本文在第3章设计改进的一致性算法,通过步长协调与数据补偿机制,增强潮流计算过程中各节点任务间的数据一致性。

2 边缘节点分布式光伏无功-电压控制模型

本文构建的准实时无功-电压优化控制模型由潮流分析、光伏无功控制与OLTC协同机制三部分构成。首先,通过边缘节点执行前推回代潮流分析,获取局部电压状态;其次,基于下垂控制(droop control, DC)策略调节光伏逆变器的无功输出;最后,在逆变器调节能力受限时,触发OLTC动作,实现多设备协调调压。同时,结合通信延迟特性,引入改进的一致性算法来优化边缘节点的数据同步步长。主动配电网调压可获得的无功容量主要依赖于光伏逆变器的有功发电量及其功率因数^[24],其逆变器的无功与光伏自身有功出力相关。

2.1 光伏电压控制策略

边缘节点通过回代模型实时监测光伏节点电压,并预先配置光伏节点的监控权限。当检测到电压异常时,边缘节点向其监控区域内的光伏逆变器发送调压指令。由回代任务计算得到第 g 次迭代下的数据 $B_{E(k)}$,边缘节点判断光伏节点的电压是否超限,即:

$$V_i^{\min} < V_i^g < V_i^{\max} \quad (5)$$

式中: V_i^g 为第 g 次迭代下节点 i 电压幅值; $V_i^{\min}$ 、 $V_i^{\max}$ 分别为节点 i 电压幅值的最小值和最大值。

边缘节点根据其前推过程中第 g 次迭代下的数据 $X_{E(i)}$ 进行无功吸收或补偿。此外,功率控制采用DC方案与最大功率点跟踪技术^[25]。设置控制电压的参考幅值 V_{ref1} 与 V_{ref2} 。在第 g 次迭代下,当光伏节点电压满足 $V_i^{\min} < V_i^g < V_{\text{ref2}}$ 时,边缘节点对其监控区域内的光伏发送指令,逆变器补偿功率,直至 V_i^g 升高至 V_{ref2} ;当光伏节点电压满足 $V_{\text{ref1}} < V_i^g < V_i^{\max}$ 时,边缘节点对其监控区域内的光伏发送指令,逆变器补偿功率,直至 V_i^g 降低至 V_{ref1} 。经过逆变器控制,电压始终稳定在参考值 V_{ref1} 与 V_{ref2} 之间。逆变器补偿或吸收的无功为:

$$Q_{\text{pv}} = \sqrt{S_{\text{pv}}^2 - P_{\text{pv}}^2} \quad (6)$$

式中: Q_{pv} 为光伏无功出力; S_{pv} 为光伏的装机容量; P_{pv} 为光伏有功出力。

2.2 OLTC协同控制策略

当光伏出力达到上限 $P_{\text{pv}}^{\max}$ ($P_{\text{pv}} = P_{\text{pv}}^{\max}$)时,逆变器无功能力受限,此时OLTC作为后备调压设备介入,

OLTC通过分接头调整补偿电压偏差,其动作阈值需与逆变器DC协调,避免调压冲突。根据母线电压的慢速(分钟级)变化调整分接头,避免频繁动作,且光伏逆变器优先动作。触发条件为:

$$\begin{cases} |V_i^g - V_{ref}| > V_{db} \\ \Delta t > T_{threshold} \\ P_{pv} \geq \eta P_{pv}^{max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_{ref} 为预设调压参考电压幅值,当 $V_i^g > V_{ref}$ 时, $V_{ref} = V_{ref1}$, 当 $V_i^g < V_{ref}$ 时, $V_{ref} = V_{ref2}$; V_{db} 为设定的死区电压,为 OLTC 允许电压偏差范围; Δt 为电压越限的持续时长; $T_{threshold}$ 为预设的 OLTC 动作阈值时长; η 为逆变器功率调节能力临界阈值系数。

为实现对调压动作的量化控制,引入挡位变化量 ΔN_{tap} , 其计算公式为:

$$\Delta N_{tap} = \begin{cases} 1 & V_2 < V_{ref2} - \frac{V_{db}}{2} \\ 0 & V_{ref2} - \frac{V_{db}}{2} \leq V_2 \leq V_{ref1} + \frac{V_{db}}{2} \\ -1 & V_2 > V_{ref1} + \frac{V_{db}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_2 为 OLTC 中压侧电压。

调压动作后的调压量为:

$$V_{adj}^g = V_i^g [1 \pm \xi \cdot \text{sign}(\Delta N_{tap})] \quad (9)$$

式中: V_{adj}^g 为调压动作后的调压量; ξ 为分接头步长系数; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数,用于明确挡位变化量 ΔN_{tap} 的调整方向,其定义如式(10)所示。

$$\text{sign}(\Delta N_{tap}) = \begin{cases} 1 & \Delta N_{tap} > 0 \\ 0 & \Delta N_{tap} = 0 \\ -1 & \Delta N_{tap} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

OLTC 协同控制如图 3 所示,在控制步长 $T_{control}$ 下,当光伏达到其临近最大有功出力 ($P_{pv} = \eta P_{pv}^{max}$) 时,光伏逆变器调压能力较差(图中 T_1 至 T_5 间红色区域),且电压与参考电压间的差值大于设定的死区电压 (V_{db})。为了减少 OLTC 频繁动作,设置其动作延迟阈值 $T_{threshold}$ (包含机械延迟时间),电压越限的持续时长 Δt 为 $|V_i^g - V_{ref}| > V_{db}$ 的持续时间,且 $\Delta t > T_{threshold}$ 。因此,在 T_3 至 T_4 间触发 OLTC 调压,且 T_4 时 OLTC 动作,完成协同调压。

3 改进一致性算法下的通信延迟优化模型

基于边缘计算的潮流分析使得网络中数据传输与计算任务更加繁杂,在通信网络层面,边缘节点任务计算所消耗的时间与边缘节点间通信均会因受到通信网络阻塞或带宽限制的影响而产生通信延迟。前推回代计算依赖于边缘节点间的数据传输时序,而通信延迟会影响迭代同步与收敛速度。优化模型通过调整各节点计算步长,使其在容错范围内保持

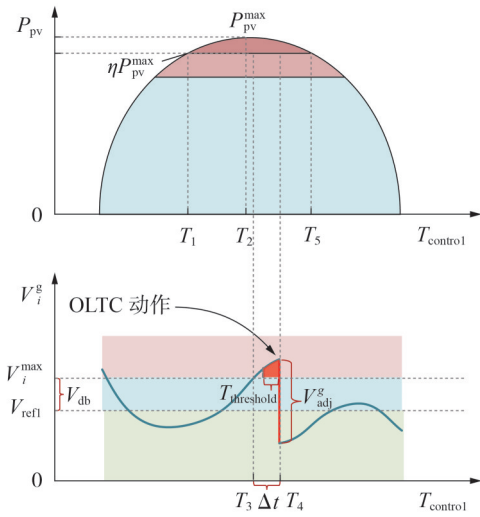


图3 OLTC 协同控制

Fig.3 OLTC coordinated control

同步,从而减少延迟导致的迭代中断或重复计算。步长优化模型根据该信息进行通信步长的最优配置。两模型在每轮迭代中协同作用,形成“数据—计算—控制”的闭环^[26]。一致性算法原理如附录 C 所示。

根据附录 C 式(C1)—(C5),优化步长模型为:

$$\begin{cases} \min f = GT_{it}^g \\ V_j^2 = V_i^2 - 2Z_{ij} S_{from_bus\ i} + I_{ij}^2 Z_{ij}^2 \\ P_i = P_{pv,i} - P_{load,i}, \quad Q_i = Q_{pv,i} - Q_{load,i} \\ 0 \leq P_{pv,i} \leq \bar{P}_{pv,i}, \quad 0 \leq Q_{pv,i} \leq \bar{Q}_{pv,i} \\ \varepsilon \leq T_{it}^g \end{cases} \quad (11)$$

式中: f 为步长优化目标函数; G 为一致性算法下的潮流收敛次数; T_{it}^g 为边缘节点第 g 次迭代下的计算步长; I_{ij} 为节点 i 到节点 j 的电流值; P_i 为节点 i 的有功功率; $P_{pv,i}$ 为节点 i 的光伏有功出力; $P_{load,i}$ 为节点 i 的负荷有功功率; Q_i 为节点 i 的无功功率; $Q_{pv,i}$ 为节点 i 的光伏无功出力; $Q_{load,i}$ 为节点 i 的负荷无功功率; $\bar{P}_{pv,i}$ 、 $\bar{Q}_{pv,i}$ 分别为节点 i 的光伏有功和无功出力上限; ε 为系统通信最短步长。

首先,动态调整数据接收窗口,在边缘节点任务传输的过程中,将原定的固定接收时间 T_{end} 延长为 T_{newend} ,以容纳带宽限制等因素引起的通信延迟,确保更多有效数据参与当前迭代计算。其次,设定冗余步长容差区间,允许边缘节点间存在 $\pm 10\%$ 的步长偏差,只要延迟在该范围内,就可完成 1 次协同迭代,提升系统容错性。若某边缘节点数据接收时间 T_i 超出设定范围,则认为数据丢失,并使用上一次迭代数据进行补偿。最后,为优化边缘节点间的同步步长分配,构建以潮流收敛次数最小化为目标的同步优化模型,并通过 SOCP 方法求解最优步长,实现通信受限环境下的高效控制响应。

模型基于SOCP优化计算步长。SOCP是凸优化的一种扩展,能够处理具有二阶锥约束的优化问题^[27]。步长优化目标函数的求解步骤如下。

1)将非线性约束与功率约束转换为SOCP形式,即:

$$\|V_j^2 - V_i^2 + 2Z_{ij}S_{\text{from_bus } i} + I_{ij}^2 Z_{ij}^2\|_2 \leq 0 \quad (12)$$

$$\|P_{\text{pv},i} - P_{\text{load},i}\|_2 \leq P_i \quad (13)$$

$$\|Q_{\text{pv},i} - Q_{\text{load},i}\|_2 \leq Q_i \quad (14)$$

2)在优化过程中确定决策变量,包括各节点电压幅值、各节点功率、分布式光伏出力与无功。

3)通过调用求解器来求解问题,并返回最优解。

4 算例仿真与分析

选取10 kV电压等级的典型配电网对所提出的考虑终端通信延时的主动配电网准实时无功-电压控制方法进行验证^[28]。测试系统如附录D图D1所示,包括135个节点和133条支路,系统的额定电压为10 kV,OLTC高压侧连接母线节点的电压等级为10 kV,低压侧接入光伏与负荷节点的电压等级为0.38 kV。在主频为3.5 GHz、内存为16 GB的PC上,基于MATLAB R2023a平台编写程序进行仿真, MATLAB中内嵌Gurobi优化工具箱。

4.1 边缘节点部署与通信步长优化

结合PCC与VDS指标,得出边缘节点部署在节点3、10、34、45、67、107、119。每次采样步长 $T_{\text{sample}} = 15 \text{ min}$,全局采样96次。在第44次采样过程中发生通信延迟事件,利用一致性算法得到的补偿如图4所示。为应对边缘节点之间通信延迟引发的数据不同步问题,引入冗余通信步长补偿机制。具体而言,以原计算固定步长 $T_{\text{set}} = 0.4 \text{ s}$ 为基准,利用一致性算法得到的最优步长 $f = 0.643 \text{ s}$,即为 T_{newend} 。设定 $\pm 10\%$ 的容差范围,即 $0.578 \sim 0.643 \text{ s}$ 。在该范围内,各边缘节点即使存在轻微延迟,也可视为同步有效,从而完成协同迭代。边缘节点通信延迟范围为 $0.231 \sim 0.593 \text{ s}$,一致性算法得到的协同步长使得原

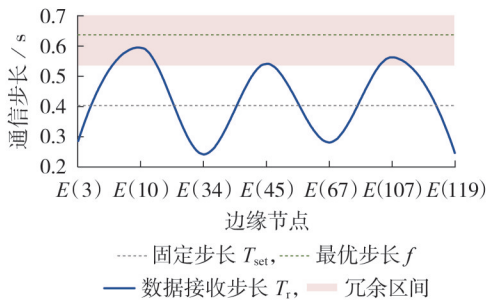


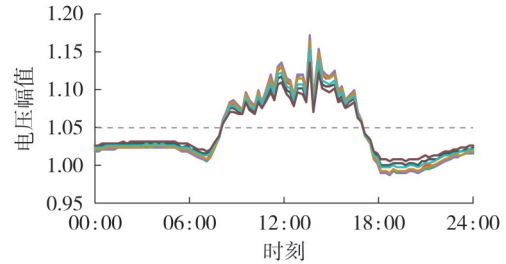
图4 第44次采样中一致性算法的结果

Fig.4 Results of consensus algorithm during 44th sampling

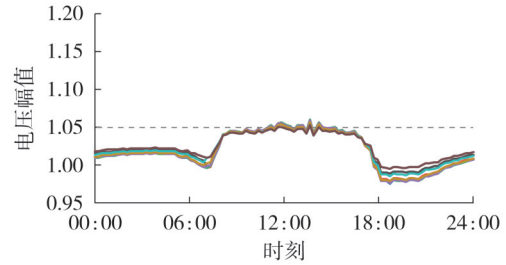
$E(10)$ 、 $E(45)$ 、 $E(107)$ 节点的延迟有所缩短,延迟平均值为 0.387 s 。

4.2 基于边缘计算的潮流无功电压控制分析

在主动配电网中接入30座光伏电站,光伏节点如附录D图D1所示。选取8个节点,控制前、后的电压变化情况如图5所示(图中电压幅值为标幺值,后同)。由图5(a)可知,自08:00起部分节点电压开始超过1.05 p.u.,随着光伏出力的增大,电压持续上升并在中午时段达到峰值,最大值略超过1.06 p.u.,在17:00后,部分节点电压出现一定波动,整体呈下降趋势,波动幅度处于合理范围内。由图5(b)可知,在本文控制方法下,光伏逆变器与OLTC协同调节,将各边缘节点所在分区的电压峰值有效限制在1.06 p.u.以内,将电压均值控制为1.05 p.u.左右,该值较原始无控制情形下的1.08 p.u.下降了0.03 p.u.左右。OLTC的死区电压 V_{db} 设置为0.005 p.u.,逆变器功率调节能力临界阈值系数 η 设定为80%,参考电压 V_{ref} 设为1.045 p.u.。当分区内任一节点电压超过该参考值时,边缘节点将触发其所辖区域内的OLTC调节机制,实现局部协同控制,有效抑制电压越限现象。



(a) 控制前电压幅值



(b) 本文控制方法的控制效果

— 节点11, — 节点22, — 节点41, — 节点68
— 节点83, — 节点88, — 节点90, — 节点122

图5 典型日电压幅值分布曲线

Fig.5 Voltage amplitude distribution curves in typical day

图6(a)展示了未考虑通信延迟优化时的电压控制情况。通信延迟导致边缘节点指令异步执行,进而引发控制不当和响应滞后的现象。第40次迭代对应11:00—12:00的电压控制计算期间,在该时段发生了约30次通信延迟,其中边缘节点对光伏逆变

器电压指令的控制延迟达到18次。在11:00、11:30、12:00、13:30、13:45、14:30,光伏节点电压也出现了短时突起且未能及时回落的现象。通信延迟导致控制指令不同步,部分逆变器未能及时响应,且由于指令步长过大和数据丢包,控制出现明显滞后,进而引发局部电压波动。图6(b)展示了OLTC不参与调压时的电压曲线,电压超过参考电压1.045 p.u.,且在 $P_{pv} \geq 80\%P_{pv}^{\max}$ 时,无功调节能力显著下降,仅依靠边缘节点控制的逆变器难以使电压有效降低,整体电压在1.055 p.u.附近波动,缺乏OLTC的辅助调节使得无法进一步控制电压。

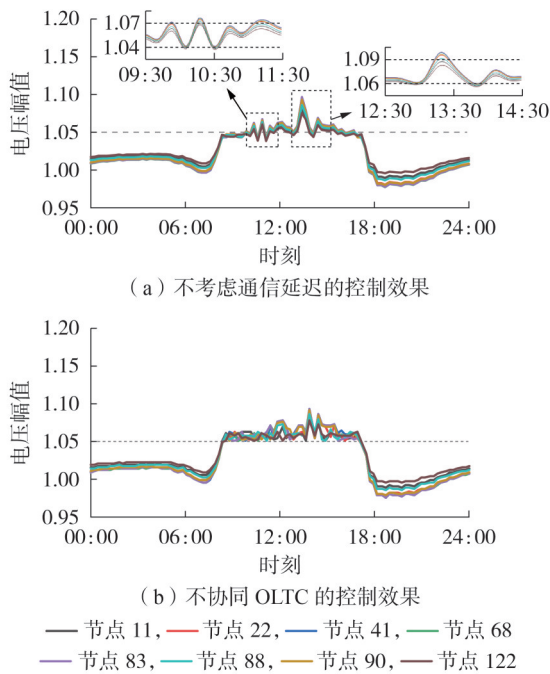
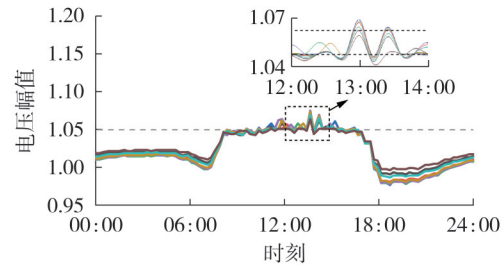


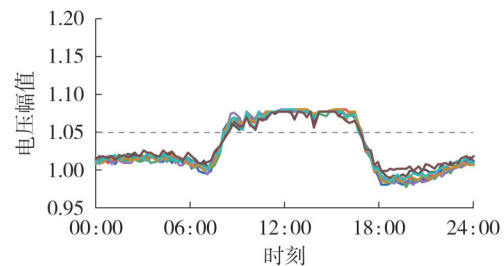
图6 不同场景下典型日电压幅值曲线

Fig.6 Voltage amplitude curves under different scenarios in typical day

图7(a)、(b)分别展示了文献[29]中鲁棒模型预测分钟级无功优化控制方法和文献[30]中光储联合控制方法的控制曲线。与文献[29]控制方案相比,本文控制方案在控制精度与调压效率方面具有显著优势:部分节点电压在鲁棒控制下虽未越限,但在较长时间维持在高电压(1.06 p.u.以上)区域,增加了系统运行的电压裕度压力,而本文方案通过精细化调控逆变器无功输出以及协同OLTC分接调节,有效压制了电压尖峰,使节点电压更快收敛至1.05 p.u.以下,具备更优的动态响应性能;本文方案的调压过程更加平滑,显著减少了调节次数,降低了调节幅度。文献[30]通过储能系统调控有功功率来降低网损。在多数时段,储能系统的SOC在40%~90%内波动,个别节点SOC在高峰负荷时段(如12:00—14:00、18:00—20:00)迅速下降,充放电效率达到80%。与本文控制方案的结果对比反映出该储能调



(a) 考虑不确定性鲁棒模型预测控制的效果



(b) 考虑光储协同联合优化控制的效果

— 节点 11, — 节点 22, — 节点 41, — 节点 68
— 节点 83, — 节点 88, — 节点 90, — 节点 122

图7 不同控制方案下的典型日电压幅值曲线

Fig.7 Voltage amplitude curves under different control schemes in typical day

控策略对扰动感知不敏感、调节节奏与幅度匹配欠佳的问题。

5 结论

本文针对高渗透光伏接入主动配电网的电压波动问题,基于边缘计算提出计及量测终端通信延迟的主动配电网准实时无功-电压控制。该模型通过边缘计算节点进行局部计算和准实时控制,监测和调整光伏逆变器的无功功率输出。此外,在模型中引入一致性算法来优化数据同步,减少通信延迟对控制效果的影响,并通过SOCP方法优化计算步长,提升收敛速度和计算效率。仿真结果表明,所提控制方法比传统方法在电压控制精度和计算速度上具有显著优势,能够有效应对高渗透光伏接入后的电压波动问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐俊俊,吴在军,周力,等. 考虑分布式电源不确定性的配电网鲁棒动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4715-4725, 4976.
XU Junjun, WU Zaijun, ZHOU Li, et al. Robust dynamic re-configuration for distribution networks considering uncertainty of distributed generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4715-4725, 4976.
- [2] 徐俊俊,吴在军,张腾飞,等. 融入多源量测数据的配电网分布式区间状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 8888-8899.
XU Junjun, WU Zaijun, ZHANG Tengfei, et al. A distributed

- interval state estimation framework of distribution networks based on multi-source measurements[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(24): 8888-8899.
- [3] 王书征,赵洋,李沛林,等. 考虑电压-无功调节的台区互联装置规划方法[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(3): 111-120.
WANG Shuzheng, ZHAO Yang, LI Peilin, et al. Planning method of station area interconnection device considering voltage-reactive power regulation[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2024, 43(3): 111-120.
- [4] ZHANG W, ZHANG C, LI J Y, et al. Multi-resource collaborative service restoration of a distribution network with decentralized hierarchical droop control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(1): 19-37.
- [5] 符杨,武洁,苏向敬,等. 不平衡主动配电网电压无功两阶段多目标鲁棒优化[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(5): 79-87.
FU Yang, WU Jie, SU Xiangjing, et al. Two-stage multi-objective robust optimization of voltage/var for unbalanced active distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(5): 79-87.
- [6] 李鹏,习伟,李鹏,等. 基于边缘计算的配电网数字化转型关键问题分析与展望[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(6): 29-41.
LI Peng, XI Wei, LI Peng, et al. Analysis of key issues and prospect for digital transformation of distribution networks based on edge computing[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(6): 29-41.
- [7] HUO Y D, LI P, JI H R, et al. Data-driven coordinated voltage control method of distribution networks with high DG penetration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(2): 1543-1557.
- [8] JIAO W S, CHEN J, WU Q W, et al. Distributed coordinated voltage control for distribution networks with DG and OLTC based on MPC and gradient projection[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(1): 680-690.
- [9] 李宗强,赵耀,王云,等. 面向有功潮流最优问题的配电网集群划分策略[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(3): 151-160.
LI Zongqiang, ZHAO Yao, WANG Yun, et al. Distribution network cluster division strategy for active power flow optimization problem[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2024, 43(3): 151-160.
- [10] 杨宇,文福拴,周星龙,等. 高光伏渗透率配电系统电压协同控制研究综述[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(10): 48-58.
YANG Yu, WEN Fushuan, ZHOU Xinglong, et al. Research review of voltage cooperative control in distribution system with high photovoltaic penetration[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(10): 48-58.
- [11] SU C S, YIN C Y, LI F T, et al. A novel recovery strategy to suppress subsequent commutation failure in an LCC-based HVDC[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(1): 38-51.
- [12] 吕永青,窦晓波,杨冬梅,等. 含荷电状态修正和通信延迟的储能电站负荷频率鲁棒控制[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(10): 59-67.
LÜ Yongqing, DOU Xiaobo, YANG Dongmei, et al. Load-frequency robust control for energy storage power station considering correction of state of charge and communication delay[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(10): 59-67.
- [13] 张凡,高红均,吴子豪,等. 局域能源市场多产消者P2P交易框架设计[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(12): 17-25.
ZHANG Fan, GAO Hongjun, WU Zihao, et al. Design of P2P trading framework for multiple prosumers in local energy market[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(12): 17-25.
- [14] LI S Y, WU W C. Adaptive voltage control to coordinate multiple PV inverters as a cluster[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(6): 5526-5538.
- [15] YAN R D, XING Q, XU Y. Multi-agent safe graph reinforcement learning for PV inverters-based real-time decentralized volt/var control in zoned distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(1): 299-311.
- [16] 李嘉伟,巨云涛,张璐,等. 基于分布鲁棒模型预测控制的微电网多时间尺度优化调度[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 45-55.
LI Jiawei, JU Yuntao, ZHANG Lu, et al. Multi-time scale distributed robust optimal scheduling of microgrid based on model predictive control[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2024, 43(4): 45-55.
- [17] 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 Yaoliang, ZHAO Qianyu, et al. Multi-stage local-distributed voltage control strategy of distribution network considering photovoltaic-energy storage coordination[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(1): 1-9.
- [18] TEWARI T, MOHAPATRA A, ANAND S. Coordinated control of OLTC and energy storage for voltage regulation in distribution network with high PV penetration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1): 262-272.
- [19] WANG L C, WANG T, HUANG G, et al. Softly collaborated voltage control in PV rich distribution systems with heterogeneous devices[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(4): 5991-6003.
- [20] 赵乐,许凌,张梦瑶,等. 考虑非完美通信的高比例光伏配电网模糊电压控制策略[J]. *广东电力*, 2023, 36(12): 9-16.
ZHAO Le, XU Ling, ZHANG Mengyao, et al. Fuzzy voltage control strategy for high proportion photovoltaic distribution network considering non-perfect communication[J]. *Guangdong Electric Power*, 2023, 36(12): 9-16.
- [21] 孙文文,何国庆,刘纯,等. 物联网背景下应用于光伏发电的边缘计算设备关键技术研究及应用[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(7): 38-43.
SUN Wenwen, HE Guoqing, LIU Chun, et al. Research and application of key technologies for edge computing equipment used in photovoltaic power generation under background of IoT[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(7): 38-43.
- [22] 陈谦,冯源,李成,等. 面向边缘计算的新能源台区数字化潮流算法[J]. *电气传动*, 2025, 55(1): 61-69.
CHEN Qian, FENG Yuan, LI Cheng, et al. Edge computing oriented real-valued power flow algorithm for new energy station areas[J]. *Electric Drive*, 2025, 55(1): 61-69.
- [23] XU Z Q, JIANG W, XU J J, et al. A power-grid-mapping edge computing structure for digital distributed distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(4): 3432-3445.
- [24] 吴毓峰,杨胜春,潘振宁,等. 无协调主体的多产消者完全端到端交易机制[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(3): 96-103.
WU Yufeng, YANG Shengchun, PAN Zhenning, et al. Complete peer-to-peer transaction mechanism for multiple prosumers without coordination entity[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(3): 96-103.
- [25] 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 clusters[J].

- Power System Protection and Control, 2023, 51(22):155-166.
- [26] 邱鹏宇, 蔡新雷, 孟子杰, 等. 基于考虑通信延迟改进分布一致性算法的多储能电站快速低寿命损耗功率均衡分配策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8):18-26.
- DI Pengyu, CAI Xinlei, MENG Zijie, et al. Fast and low life loss power equalization allocation strategy of multiple battery energy storage stations based on improved distributed consistency algorithm considering communication delay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8):18-26.
- [27] 杨晓辉, 王晓鹏, 邓叶恒. 含电动汽车的主动配电网多目标分层优化调度[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4):156-165.
- YANG Xiaohui, WANG Xiaopeng, DENG Yeheng. Multi-objective hierarchical optimization dispatch of active distribution network with electric vehicles[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2024, 43(4):156-165.
- [28] XU D L, WU Z J, XU J J, et al. Data-model hybrid driven topology identification framework for distribution networks[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(4):1478-1490.
- [29] 茹秋实, 米雪峰, 宋志刚, 等. 含可控光伏的主动配电网多时间尺度鲁棒优化调度[J]. 广东电力, 2022, 35(12):11-21.
- RU Qiushi, MI Xuefeng, SONG Zhigang, et al. Multi-time scale robust optimal scheduling of active distribution network with controllable photovoltaic[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(12):11-21.
- [30] 黄伟, 刘斯亮, 羿应棋, 等. 基于光伏并网点电压优化的配电网多时间尺度趋优控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3):92-100.
- HUANG Wei, LIU Siliang, YI Yingqi, et al. Multi-time-scale slack optimal control in distribution network based on voltage optimization for point of common coupling of PV[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3):92-100.

作者简介:

穆 煜(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能配电网优化控制(**E-mail**: 1203079558@qq.com);

徐俊俊(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为信息物理系统(**E-mail**: jjxu@njupt.edu.cn);

张腾飞(1980—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为新型配电系统运行与控制(**E-mail**: zhangtf@njupt.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Quasi-real-time reactive power-voltage control of active distribution network considering communication delay of measurement terminals

MU Yu¹, XU Junjun¹, ZHANG Tengfei¹, ZHANG Huilin², WU Juai¹

(1. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: The large-scale integration of distributed generation sources and intelligent measurement terminals into distribution network leads to the increase of data and traffic, which results in delayed response of the traditional centralized voltage control and aggravated voltage fluctuation. Therefore, a quasi-real-time reactive power-voltage control method for active distribution network is proposed considering the terminal communication delay. The edge nodes are deployed based on network topology mapping. The edge computing is used for forward and backward power flow analysis of distribution network, so as to complete the local computation and distributed management of power flow, voltage and line loss. On the basis of quasi-real-time monitoring of photovoltaic node voltage, a droop style voltage control strategy based on the edge nodes is constructed in coordination with photovoltaic. Aiming at the asynchronous control steps problem brought by communication delay, an improved consensus algorithm is introduced to achieve data synchronization. The example simulation results show that the proposed method has a certain advantage in the aspect of command response time, and it can solve the node voltage fluctuation problem caused by photovoltaic integration, and enhance the stability and reliability of operation and regulation in active distribution network.

Key words: active distribution network; distributed photovoltaic; voltage control; communication delay; edge computing; reactive power optimization