第49卷 第22期 2025年11月25日
DOI：10.7500/AEPS20250217003
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 22 Nov. 25，2025

数据驱动的低压有源配电网电压在线调控策略

申亚涛，王子鉴，谷紫文，黄　纯
（湖南大学电气与信息工程学院，湖南省长沙市 470082）

摘要：含高比例户用光伏的低压有源配电网面临严重的过电压问题。同时，拓扑结构和线路参数的缺失，进一步增加了电压优化调控难度。为此，提出一种数据驱动的电压在线调控策略。首先，通过数据驱动的方法，在线辨识与更新系统节点电压-功率方程中的参数，为动态估计节点电压提供基础。然后，建立以最大化光伏消纳为目标的电压优化调控模型，并根据模型求解结果，在控制光伏逆变器跟踪无功指令的同时，对有功输出进行动态限幅，从而实现电压的有效调控。算例结果表明，该策略不仅在无电气模型的条件下解决了节点电压估计问题，而且可以按照无功优先的原则有效治理过电压，实现光伏最大化消纳，验证了所提策略的有效性。

关键词：光伏；有源配电网；电压调控；消纳；过电压治理

0　引言

截至2024年9月底，中国户用光伏并网容量累计达139 GW[1]。高比例户用光伏接入低压配电网构成低压有源配电网，并导致其在光伏高发时段面临严重的过电压问题[2-3]，亟须研究有效的电压调控策略。

现有电压调控策略可分为有模型和无模型两类。有模型策略通常基于潮流方程构建电压优化调控模型。文献[4-5]基于二阶锥凸松弛后的潮流方程建立电压优化调控模型，其中，文献[4]采用交替方向乘子法求解，而文献[5]则将问题转化为多利益主体的互动博弈模型进行求解。文献[6]基于线性化的DistFlow潮流方程，建立中低压不平衡配电网无功实时优化模型，实现中低压不平衡配电网节点电压偏差的最小化。文献[7]结合系统潮流方程和电压灵敏度矩阵，构建日前-日内-实时多时间尺度优化控制模型，以治理电压越限问题。有模型电压调控策略具有清晰的物理意义，但是需要配电网相对完善和精确的参数，难以在线路阻抗和拓扑结构参数缺失的低压有源配电网中应用。

为摆脱对电网模型的依赖，下垂控制[8-9]和基于一致性算法[10-11]的分布式控制策略是两种典型的无模型电压调控策略。但是，下垂控制存在功率均分和实现全局最优控制的难题，一致性算法对通信网络的拓扑结构和收敛效率的优化设计要求较高。

随着人工智能的发展，大量数据驱动的无模型调控策略应运而生[12]。文献[13]基于最优潮流样本，通过梯度下降算法训练光伏逆变器模糊控制器中的参数，以实现全局电压优化。文献[14-16]将电压调控建模为马尔可夫决策过程，采用深度强化学习训练调压智能体，以实现电压的实时优化控制。此类策略将电压优化调控问题整体建模，直接通过机器学习生成调控策略，但因属于黑箱模型，解释性差，且难以始终确保调控指令的可行性。为此，文献[17]基于历史数据训练神经网络，拟合功率与电压关系获得电压灵敏度，以优化光伏发电计划。文献[18]通过正则化的数据驱动预测控制算法建立隐式的系统等效代理模型，获得功率与电压之间的映射关系，进而在线滚动优化无功功率以实现调压。文献[19-20]利用深度神经网络和深度强化学习训练代理模型，隐式代替系统的潮流方程，然后，基于代理模型，利用深度强化学习训练电压优化调控策略。此类方法与直接式相比，增加了节点功率-电压模型拟合环节，提高了模型的可解释性，有助于确保调控策略的可行性。但是，上述两类方法在训练模型时均需要整定大量超参数，面对工况各异的低压有源配电网时，存在模型泛化难题。此外，低压有源配电网中电压控制目标仅需满足安全范围，无须趋近额定值，而当前的无模型调控策略普遍以减小电压偏差为目标，会显著增加系统调压时的有功或无功补偿量[21]。

收稿日期：2025-02-17；修回日期：2025-05-21。
上网日期：2025-07-11。
湖南省科技创新重大项目(2020GK1010)。

本文针对上述电压调控策略中的不足，结合含高比例户用光伏的低压有源配电网实际运行工况，提出基于智能电表数据驱动的电压在线调控策略。首先，通过在线辨识节点电压-功率方程参数，为动态估计节点电压提供基础。然后，构建以最大化光伏消纳为目标的电压优化调控模型，控制光伏逆变器有功和无功功率。所提策略无须依赖网络参数，建立的节点电压-功率方程和电压优化调控模型均具有清晰的物理意义，能够在线实时更新和运行，便于及时响应光伏出力和用户负荷的不确定性。

1　电压在线调控策略

1.1　低压有源配电网概述

一个含高比例光伏的低压有源配电网通常包含一台 10 kV/0.4 kV 的配电变压器（以下简称配变）和若干条呈放射形结构的低压馈线，典型结构如图 1 所示[22]。图 1 中重点展示了一条馈线的详细结构。其中，下户线表示馈线分裂节点到用户的公共连接点（point of common coupling，PCC）之间的供电线路，下户线与馈线的连接点称为分裂节点；含有蓝色方框的用户表示还安装了户用光伏系统。含高比例户用光伏的低压有源配电网主要位于农村或城市郊区，馈线形式以三相四线制的架空线为主，下户线则由用户的需求决定，可以是单相，也可以是三相。由于低压有源配电网靠近用户侧，其拓扑结构和线路参数等资料管理不完善，特别是用户相别、下户线长度及分裂节点位置等关键信息缺失，难以准确建立系统的潮流模型，进而导致节点电压难以精确估计[23]。

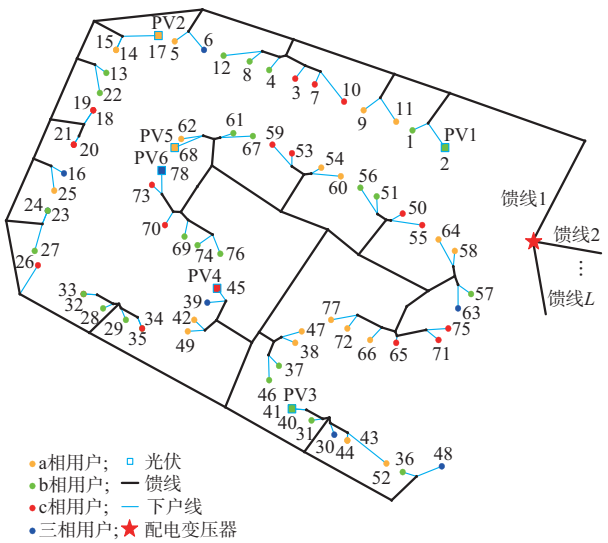

图 1　低压有源配电网示例

Fig. 1　Case of low-voltage active distribution network

按照户用光伏发电消纳模式的不同，主要可分为全额上网（full feed-in scheme，FFiS）和自发自用、余电上网（self-consumption with surplus feed-in scheme，Sc-SFiS）两种[24]，对应的典型接线方式如附录 A 图 A1 所示。FFiS 模式中，光伏系统和用户负荷分别通过一台智能电表进行计量，可以直接测量负荷和光伏的电气量信息，用户的 PCC 位于两台智能电表的网侧；Sc-SFiS 模式中，光伏系统与用户负荷共用一台可以双向计量的用户总表，然后在总表和光伏系统之间，再加装一台光伏专用智能电表，专门用于测量光伏并网点的信息，并间接得到用户负荷的净功率和用电量信息，用户的 PCC 位于用户总表的网侧。由于两种模式中均存在唯一的用户 PCC，且该节点处的电压和功率信息最为全面，故本文所提电压调控主要指调控用户 PCC 处的电压。

此外，如附录 A 图 A1 所示，光伏专用智能电表处通常还安装有先进的边缘控制终端（edge control unit，ECU），能够与配电网主站交互通信，以实现对光伏系统的监测和控制。配变低压侧安装有配变终端（transformer terminal unit，TTU）和智能电表，用于实时监测配变的运行状态和计量低压配电网总的供电情况。低压配电网中的智能电表、ECU 和 TTU 共同构成了基本监控系统，不仅可以定期将各类监测数据上传至主站，而且可以响应主站的调控指令。其中，智能电表采集的电压、有功功率和无功功率这 3 类基本数据为实施电压调控提供了重要的数据基础。本文所提电压在线调控策略便是基于这 3 类基本数据实现的，无须额外增加测量装置，便于在实际的低压有源配电网中部署应用。

1.2　电压在线调控策略整体框架

本文所提电压在线调控策略整体框架如图 2 所示，主要包含两个环节：1）低压有源配电网节点电压-功率方程的参数辨识；2）以最大化光伏消纳为目标的电压优化调控。在低压有源配电网节点电压-功率方程的参数辨识环节中，针对拓扑结构和线路参数缺失的情况，首先，根据低压有源配电网的开环运行特征，构造节点电压平方与节点注入功率之间的线性方程；然后，根据每个控制周期内智能电表采集的电压与功率信息，利用含遗忘因子的正则化递推最小二乘法，动态辨识与更新方程中的参数，获得节点注入功率与节点电压响应之间的定量映射关系。在以最大化光伏消纳为目标的电压优化调控环节中，联合节点电压-功率方程、节点电压安全限值、光伏出力能力等多重约束条件，建立电压优化调控模型，在线计算下一控制周期中各光伏的有功出力上限和无功出力指令，从而在实时运行过程中，各光

伏ECU在控制逆变器跟踪无功指令值的同时，根据有功出力上限，对自身的实际有功出力进行动态限幅，兼顾节点电压安全和光伏的最大化消纳。

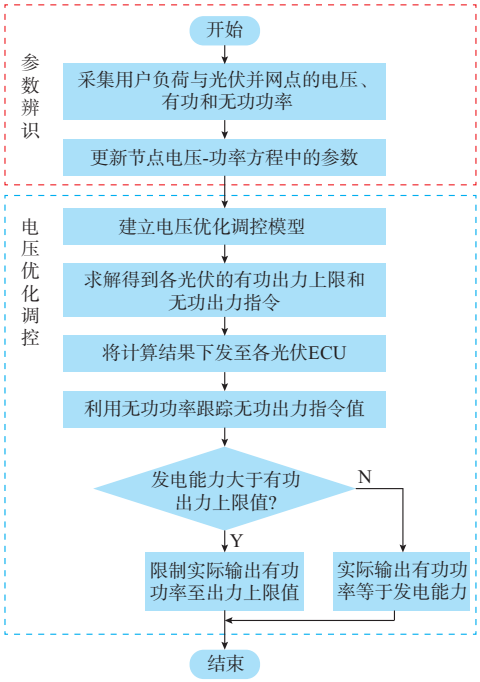

图2　电压在线调控策略流程图

Fig. 2　Flow chart of online voltage regulation strategy

2　节点电压-功率方程的参数辨识

常规的DistFlow潮流模型采用单相建模，针对的是三相对称系统，而低压有源配电网包含大量单相负荷，存在相对显著的三相不平衡情况。本文将DistFlow潮流模型扩展到三相不平衡低压有源配电网的建模中，以提高建模精度。

将用户PCC中的每个相别称为一个计算节点，则一个单相用户PCC对应一个计算节点，一个三相用户PCC对应3个计算节点。设含有G个用户PCC的低压有源配电网中共包含$N(G\leqslant N)$个计算节点，参考文献[25]中方法，可以得到计算节点电压平方与节点注入功率之间的线性方程，如式(1)所示。

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{W}\boldsymbol{u}_0+\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{X}\boldsymbol{Q} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{u}$为全体计算节点处相电压平方组成的列向量；$\boldsymbol{u}_0$为配变低压侧三相电压的平方构成的列向量；$\boldsymbol{P}$和$\boldsymbol{Q}$分别为全部计算节点注入的有功和无功功率构成的列向量；$\boldsymbol{W}$、$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{X}$为系数矩阵。

式(1)中$\boldsymbol{W}\in\mathrm{R}^{N\times 3}$，描述了计算节点所属的相别，故$\boldsymbol{W}$中每一行有且仅有一个元素为1，其余元素为0。$\boldsymbol{R},\boldsymbol{X}\in\mathrm{R}^{N\times N}$由系统线路阻抗参数和拓扑关系共同决定。式(1)的物理含义为：忽略线路损耗时，低压有源配电网中各计算节点的电压平方与配变低压侧同相电压的平方、各节点注入的有功功率和无功功率呈线性关系。

但是，在实际的低压有源配电网中，计算节点n的真实相别未必已知，同时，配变低压侧的相电压也并不是恒定的。因此，$\boldsymbol{W}$和$\boldsymbol{u}_0$均为未知量，影响式(1)的线性关系。为了使式(1)保持线性关系，引入新的变量$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{W}\boldsymbol{u}_0$，则式(1)可写为：

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{V}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{X}\boldsymbol{Q} \tag{2}$$

此时，第$n(1\leqslant n\leqslant N)$个计算节点的相电压平方$u_n$的表达式为：

$$u_n=V_n+\boldsymbol{R}_n\boldsymbol{P}+\boldsymbol{X}_n\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\theta}_n \tag{3}$$

式中：V_n为$\boldsymbol{V}$的第n个元素；$\boldsymbol{R}_n\in\mathrm{R}^{1\times N}$和$\boldsymbol{X}_n\in\mathrm{R}^{1\times N}$分别为$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{X}$中的第$n$行，反映了各计算节点注入的有功和无功功率对$u_n$的影响程度；$\boldsymbol{\Phi}=[1,\boldsymbol{P},\boldsymbol{Q}]\in\mathrm{R}^{1\times(1+2N)}$；$\boldsymbol{\theta}_n=[V_n,\boldsymbol{R}_n,\boldsymbol{X}_n]^{\mathrm{T}}\in\mathrm{R}^{(1+2N)\times 1}$。

由于低压有源配电网中拓扑结构和线路参数的缺失，使得式(3)中$\boldsymbol{\theta}_n$为未知参数，无法直接得到节点注入功率与节点电压之间的定量映射关系。然而，式(3)的线性形式使其属于典型的多元线性回归模型，可以根据配电网中$\boldsymbol{\Phi}$的测量值，通过数据驱动的方式辨识参数$\boldsymbol{\theta}_n$。最小二乘法(least square method，LSM)是多元线性回归分析中常用的参数估计方法，能够在u_n残差平方和最小的情况下，实现$\boldsymbol{\theta}_n$的最优估计。但是，普通的LSM需要对矩阵求逆，当低压有源配电网中计算节点总数N较多时，会显著增加计算量，计算复杂度为$O(TN^2+N^3)$，其中，T为样本数量。甚至当$\boldsymbol{\Phi}$的全体测量值所构成的矩阵不满秩时，无法得到最优估计值。$\boldsymbol{\theta}_n$的估计精度也与测量值的样本数量T正相关。为提高参数辨识精度，需要大量样本，进一步增加了计算难度，不利于在线估计。此外，普通的LSM还存在过拟合的风险。

与普通的LSM相比，含遗忘因子的递推最小二乘法可以避免矩阵求逆运算，降低了计算量，每次递推更新的计算复杂度仅为$O(N^2)$，便于在线实施，从而提高有源配电网动态变化时参数的估计精度。同时，在损失函数中加入L2正则化项，构成含遗忘因子的正则化递推最小二乘法(L2-regularized recursive least square method with forgetting factor，L2-RLS-λ)，可以有效避免过拟合，将参数向量$\boldsymbol{\theta}_n$限制在特定范围内。因此，对于式(3)，本文采用L2-RLS-λ进行参数$\boldsymbol{\theta}_n$的估计，对应的损失函数模型$J(\boldsymbol{\theta}_n)$如式(4)所示。

$$J(\boldsymbol{\theta}_n)=\sum_{\tau=1}^{T}\lambda_{T-\tau}(u_{n,\tau}-\boldsymbol{\Phi}_\tau\boldsymbol{\theta}_n)^2+\alpha\|\boldsymbol{\theta}_n\|^2 \quad (4)$$

式中：λ为遗忘因子，且$0<\lambda<1$，用于控制历史数据的权重，λ越大，表示对历史数据的依赖越大，λ越小，表示更快地遗忘历史数据；下标τ表示历史中第τ个样本；$\alpha\|\boldsymbol{\theta}_n\|^2$为L2正则化项，其中，$\alpha$为正则化参数，用于控制正则化项的权重，防止过拟合。

根据式(4)所示L2-RLS-λ损失函数，可以推导出式(5)所示递推公式，从而在实时运行过程中，每获得一组新的测量数据就可以迭代更新一次$\boldsymbol{\theta}_n$的估计值。这样不仅可以改善估计精度，而且便于在线实施电压调控。

$$\begin{cases}\boldsymbol{\theta}_{n,t}=\boldsymbol{\theta}_{n,t-1}+\boldsymbol{K}_t(u_{n,t}-\boldsymbol{\Phi}_t\boldsymbol{\theta}_{n,t-1})\\ \boldsymbol{K}_t=\dfrac{\boldsymbol{C}_{t-1}\boldsymbol{\Phi}_t^{\mathrm{T}}}{\lambda+\boldsymbol{\Phi}_t\boldsymbol{C}_{t-1}\boldsymbol{\Phi}_t^{\mathrm{T}}}\\ \boldsymbol{C}_t=\dfrac{1}{\lambda}(\boldsymbol{I}_{1+2N}-\boldsymbol{K}_t\boldsymbol{\Phi}_t)\boldsymbol{C}_{t-1}+\alpha\boldsymbol{I}_{1+2N}\end{cases} \quad (5)$$

式中：$u_{n,t}$和$\boldsymbol{\Phi}_t$分别为第t个控制周期内u_n和$\boldsymbol{\Phi}$的测量值；$\boldsymbol{\theta}_{n,t}$为$\boldsymbol{\theta}_n$在第$t$个控制周期中的估计结果；$\boldsymbol{K}_t$和$\boldsymbol{C}_t$分别为第$t$个控制周期中校正增益列向量和误差协方差矩阵的迭代结果；$\boldsymbol{I}_{1+2N}$为$1+2N$阶单位矩阵。

式(5)中需选择$\boldsymbol{\theta}_{n,t}$和$\boldsymbol{C}_t$的初值$\boldsymbol{\theta}_{n,0}$和$\boldsymbol{C}_0$，且要求$\boldsymbol{\theta}_{n,0}$是一个足够小的实向量，而$\boldsymbol{C}_0$是一个足够大的对称正定矩阵，本文中令$\boldsymbol{\theta}_{n,0}=0$、$\boldsymbol{C}_0=\boldsymbol{I}_{1+2N}$。

在每个控制周期中，对全体计算节点依次按照式(5)进行参数估计，便可完成式(2)中参数$\boldsymbol{V}$、$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{X}$的估计，为下一步电压优化调控时节点电压的计算提供基础。同时，为进一步加快计算速度，不同节点之间还可以并行计算。

3 电压优化调控

在节点电压-功率方程参数在线更新后，可以构建电压优化调控模型，计算下一控制周期内各光伏的有功消纳上限和无功出力指令，从而在跟踪无功出力指令的同时，对各光伏系统的实际有功出力上限进行动态限幅，控制节点电压处于允许范围内。具体的优化调控模型如下。

首先，基于电压调控与光伏消纳的双重需求，当系统出现电压越限时，应优先通过无功功率进行调压，仅在无功功率不足时，启动有功功率参与调压。若系统未发生电压越限，则无须进行调压操作，此时应确保光伏最大化出力，同时尽量避免不必要的无功补偿。因此，电压优化调控模型中的目标函数如式(6)所示，等号右边第1项为最大化下一控制周期中全体光伏的有功出力，第2项为无功补偿惩罚量。

$$\max_{\boldsymbol{x}} f(\boldsymbol{x})=\sum_{n=1}^{N}P_{\mathrm{PV},n}-\rho\sum_{n=1}^{N}|Q_{\mathrm{PV},n}| \quad (6)$$

式中：$\boldsymbol{x}$为决策变量，且$\boldsymbol{x}=[\boldsymbol{P}_{\mathrm{PV}},\boldsymbol{Q}_{\mathrm{PV}}]$，其中，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{PV}}$和$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{PV}}$分别为计算节点$n$处光伏发出的有功和无功功率$P_{\mathrm{PV},n}$、$Q_{\mathrm{PV},n}$构成的列向量；$\rho\in(0,1)$为惩罚系数，需要进行合理设置，取值太大则无法实现优先利用无功功率调压的目的，取值太小则会引起不必要的无功补偿。

其次，约束条件除式(2)所示节点电压-功率方程外，还包括节点电压范围约束、节点功率平衡约束、光伏出力范围约束和三相光伏出力平衡约束。

1)节点电压范围约束

$$u_{\min}\leqslant u_n\leqslant u_{\max}\quad n=1,2,\cdots,N \quad (7)$$

式中：$u_{\max}$和$u_{\min}$分别为计算节点n电压平方的上、下限允许值，低压有源配电网中的节点电压允许范围一般为0.9～1.07 p.u.[26]，故$u_{\min}=0.81$、$u_{\max}=1.145$。

2)节点功率平衡约束

$$\begin{cases}\boldsymbol{P}=\boldsymbol{P}_{\mathrm{PV}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{L}}\\ \boldsymbol{Q}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{PV}}-\boldsymbol{Q}_{\mathrm{L}}\end{cases} \quad (8)$$

式中：$\boldsymbol{P}_{\mathrm{L}}$和$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{L}}$分别为各计算节点处用户负荷吸收的有功和无功功率构成的列向量。

3)光伏出力范围约束

$$P_{\mathrm{PV},n}=(1-\gamma_n)P_{\mathrm{PV},n,\max}\quad 0\leqslant\gamma_n\leqslant 1,n=1,2,\cdots,N \quad (9)$$

$$|Q_{\mathrm{PV},n}|\leqslant Q_{\mathrm{PV},n,\max}\quad n=1,2,\cdots,N \quad (10)$$

式中：$P_{\mathrm{PV},n,\max}$为计算节点n处光伏系统在下一控制周期中有功功率最大出力能力，主要受气象条件、系统效率和额定容量影响；γ_n为弃光率；$Q_{\mathrm{PV},n,\max}$为计算节点n处光伏系统发出或吸收的最大无功功率允许值，可以设置为光伏逆变器额定功率的40%，以保证即使有功功率达到额定值，逆变器总的视在功率也小于1.1倍的额定有功容量，可以保持长期安全运行[13]。

4)三相光伏出力平衡约束

$$\begin{cases}\gamma_{n_1}=\gamma_{n_2}=\gamma_{n_3}\\ Q_{\mathrm{PV},n_1}=Q_{\mathrm{PV},n_2}=Q_{\mathrm{PV},n_3}\end{cases} \quad (11)$$

式中：n_1、n_2和n_3为三相光伏g中的3个计算节点，且$g\in\Psi$，其中，Ψ为全体三相光伏所构成的集合。

值得注意的是，$P_{\mathrm{PV},n,\max}$通常需要实时预测或计算获得，然而，实际低压配电网中往往缺乏必要的预测能力和实时的气象监测能力，无法精确获得$P_{\mathrm{PV},n,\max}$。考虑到该值只是作为约束条件式(9)的上限存在，且最大为光伏的额定功率，故在实时运行过程中，可以参考文献[27]中的方法，根据所在地经

纬度和当前时刻，估计晴天情况下的光照强度，进而结合系统的运行效率进行近似估算。

该模型的目标函数和约束条件中均含有绝对值，难以直接求解，需要进行线性化变换。首先，对任意计算节点n，引入非负变量$Q_{\mathrm{PV}+,n}$和$Q_{\mathrm{PV}-,n}$，通过式(12)所示等价代换，消除绝对值运算。然后，针对非负变量$Q_{\mathrm{PV}+,n}$和$Q_{\mathrm{PV}-,n}$，将原约束条件式(10)替换为式(13)。

$$|Q_{\mathrm{PV},n}|=Q_{\mathrm{PV}+,n}+Q_{\mathrm{PV}-,n} \tag{12}$$

$$\begin{cases}Q_{\mathrm{PV},n}=Q_{\mathrm{PV}+,n}-Q_{\mathrm{PV}-,n}\\0\leqslant Q_{\mathrm{PV}+,n}\leqslant bQ_{\mathrm{PV},n,\max}\\0\leqslant Q_{\mathrm{PV}-,n}\leqslant(1-b)Q_{\mathrm{PV},n,\max}\end{cases} \tag{13}$$

式中：b为引入的0-1辅助决策变量。全体计算节点共用一个0-1辅助决策变量，以确保全体光伏逆变器同时发出或吸收无功功率，避免无功功率在不同逆变器之间进行交换。

经过上述变换后，调控模型为混合整数线性规划模型，可以利用Cplex或Gurobi等求解器求解。

4　算例验证与分析

4.1　算例概况

基于英国西北电力公司和曼彻斯特大学公开的配电网模型库[22]，联合OpenDSS和MATLAB构建有源低压配电网电压调控仿真模型，验证本文所提策略。低压有源配电网仿真模型的结构如图1所示，该模型是基于文献[22]中17号网络的3号馈线修改而来，共包含78个用户，其中，8个为三相用户，故计算节点总数为94个。节点2、17、40、45、68和78共计6个用户节点处接入户用光伏系统。光伏系统的相数和相别与用户保持一致，具体如图1所示。三相光伏系统的额定功率为45 kW，而单相光伏系统的额定功率为15 kW。对应地，光伏逆变器每相的无功功率限值为±6 kvar。此外，由于实际低压有源配电网中，配变高压侧的电压还受上级电网影响，故仿真模型中还包含了一个中压配电网，结构如附录A图A2所示。

在负荷和光伏出力曲线方面，中压节点处等效的集中负荷曲线、低压用户的负荷曲线以及户用光伏的出力曲线在文献[22]的数据集基础上合成，共计包含10 d的数据，时间分辨率为30 min，具体见文献[28]。

仿真时，OpenDSS中运行电网模型，每30 min为一个控制周期，采样一次电压和功率数据，并按照相关规定，添加最大2%的随机噪声后发送给MATLAB，模拟智能电表的采样结果；MATLAB中建立本文所提的电压在线调控策略，在每个控制周期中根据最新的采样结果，更新节点电压-功率方程中的参数，并调用Gurobi求解器计算下一控制周期中各光伏的有功消纳上限值和无功出力指令，然后，将其作为调控命令反馈给OpenDSS；OpenDSS在实时仿真阶段，根据收到的调控命令控制光伏逆变器有功和无功功率输出值。

4.2　节点电压-功率方程参数辨识精度的验证

在仿真时先禁用电压优化调控环节，只进行参数辨识，即按照本文所提的参数辨识方法，在每个控制周期更新一次式(2)所示节点电压-功率方程中的参数，更新结果记为$\boldsymbol{V}$、$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{X}$。同时，结合算例中低压有源配电网仿真模型的拓扑结构和线路参数，通过理论方法计算方程中的参数值，并将计算结果作为基准值，如附录A图A3至图A5所示。

按照式(14)和式(15)，分别计算每个控制周期中$\boldsymbol{V}$、$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{X}$相对于基准值的均方根误差(root mean square error，RMSE)和最大绝对误差(maximum absolute error，MAE)：

$$R_{\mathrm{MSE}}=\sqrt{\frac{1}{NM}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\left(\boldsymbol{F}_{n,m}-\boldsymbol{F}_{\mathrm{B},n,m}\right)^2} \tag{14}$$

$$M_{\mathrm{AE}}=\max_{n,m}|\boldsymbol{F}_{n,m}-\boldsymbol{F}_{\mathrm{B},n,m}| \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{F}$和$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}$分别为$\boldsymbol{V}$、$\boldsymbol{R}$或$\boldsymbol{X}$的计算值和基准值，当$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{V}$时，矩阵$\boldsymbol{F}$的总列数$M=1$，而当$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{R}$或$\boldsymbol{X}$时，$M=N$，其下标$n$，$m$表示矩阵的第$n$行、第$m$列。

附录A图A6和图A7分别为$\boldsymbol{V}$、$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{X}$的RMSE和MAE随迭代更新次数的变化情况。从图中可以看出，随着更新次数的增加，RMSE和MAE均迅速减小，经过约150次的迭代更新后，基本收敛至0附近，$\boldsymbol{V}$、$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{X}$的RMSE均小于3×10^{-3}，而MAE均小于1.5×10^{-2}。对比附录A图A3至图A5中基准值的分布范围可知，本文所提方法的参数辨识结果具有良好的收敛性能和估计精度。

参数辨识的最终目的是实现电压估计，故需要进一步验证其精度。结合附录A图A6和图A7中的参数辨识精度，在验证电压估计精度时，选择第144个控制周期(即经过连续3 d的在线辨识与更新)的结果，结合未来7 d各计算节点的有功和无功功率，利用式(2)计算节点电压，并与OpenDSS仿真结果对比。同时，设置一组对照实验：将式(2)中的参数替换为理论计算值，其他条件保持不变，再次计算节点电压并与OpenDSS仿真结果对比。

附录A图A8和图A9分别为本文方法和对照实验得到的电压估计误差箱线图。对比图A8和图A9图可知，由于对照实验的参数更为精确，节点电

压的估计误差相对更小，整体略呈现正偏的情形，而且越靠近线路首端的节点，电压估计误差越小，表明对照实验的估计值整体略高于实际值，符合忽略线路阻抗时线性DistFlow模型的特征。而本文方法得到的电压误差分布范围对称，且略大于对照实验，各节点之间的误差范围与节点位置也没有显著的相关性，这主要与所用的参数辨识方法有关，即主要以最小化估计残差平方和为目标。尽管如此，本文方法得到的各节点电压相对误差中位数依然基本接近于0。在25%～75%分位数区间内，相对误差的分布范围普遍位于±0.5%之间，最大仅在±1.5%左右。综上可知，本文所提参数辨识方法具有良好的精度，可以在不依赖系统电气模型的条件下，仅根据各节点注入的功率值，实现节点电压的近似估计，建立节点功率到节点电压的定量映射关系，能够为电压优化调控提供基础。

4.3　电压优化调控结果的验证

考虑到参数辨识环节的估计精度和收敛速度，仿真实验的前144个控制周期只进行参数辨识，从第145个控制周期开始，投入电压优化调控环节，进行完整策略的仿真验证，并将该控制周期对应的时段记为0时刻，连续仿真7 d，共计336个时段。

此外，为了进行对比分析，还设置了3种对照仿真场景：

1）原始场景，即不采用任何控制措施，全体户用光伏保持工作在最大功率跟踪状态，且功率因数为1；

2）电压-无功功率（V-Q）下垂控制，光伏逆变器仅通过无功功率进行调压，V-Q下垂曲线如附录A图A10(a)所示[9]；

3）V-Q&电压-有功功率（V-P）组合下垂控制，光伏逆变器优先利用无功功率进行调压，当无功输出饱和时，再通过调节有功功率进行调压，具体的下垂控制曲线如附录A图A10所示[9]；

4）本文所提策略，充分利用光伏逆变器的二象限运行能力，同时优化有功和无功功率进行调压，优化模型的目标函数中惩罚系数设置为0.2。

4.3.1　电压在线调控策略的验证与分析

附录A图A11为4种对比实验中配电网各计算节点的电压结果。同时，从系统过电压节点数N、过电压总次数C、系统最大电压V_{max}、光伏有功消纳电量E_P、光伏无功电量E_Q和弃光电量$E_{P,cur}$等指标，统计和分析不同控制策略的效果，得到表1所示结果。结合附录A图A11与表1可以看出，原始场景中过电压问题严重，94个单相计算节点中，有37个节点总计出现了820次过电压现象，过电压节点比例达39.4%，最高电压达1.116 p.u.，且电压在不同时间和节点间波动剧烈，迫切需要治理过电压问题。其他3种调控策略中，V-Q下垂控制的过电压治理效果最差，表明在低压有源配电网中，仅靠吸收无功功率难以有效治理过电压问题。由于引入了有功调节，V-Q&V-P组合下垂控制策略显著改善了过电压现象，但却导致光伏有功功率的消纳量降低了359.8 kW·h，占总发电能力的8.78%。本文所提的调控策略在电压控制效果上与V-Q&V-P组合下垂控制策略接近，能基本消除过电压问题。同时，所提策略的有功弃光量和无功使用量均显著减少，其中，有功弃光量仅237.9 kW·h，整体消纳率提升了2.97%，吸收的无功电量仅475.7 kvar·h，降幅达88.2%。表明本文所提策略不仅能有效治理过电压问题，还能降低弃光量和无功使用量，具有更高的调压效率。

表1　不同电压调控策略的关键指标
Table 1　Key indicators for various voltage regulation strategies

调控策略	N/个	C/次	V_{max}/p.u.	E_P/(kW·h)	E_Q/(kW·h)	$E_{P,cur}$/(kvar·h)
原始策略	37	820	1.116	4 099.8	0	0
V-Q	15	248	1.099	4 099.8	4 052.8	0
V-Q&V-P	3	13	1.073	3 740.0	4 029.7	359.8
本文策略	5	28	1.074	3 861.9	475.7	237.9

附录A图A12和图A13分别为不同策略下各光伏系统有功和无功出力情况。其中，正值表示发出、负值表示吸收。在光伏有功出力方面，原始场景和V-Q下垂控制策略中，所有光伏均工作在最大功率跟踪状态，有功出力完全相同。V-Q&V-P组合下垂控制策略中，由于光伏5和光伏6均位于线路的末端，且位置接近，故二者同相电压接近，且更容易发生过电压现象，再加上下垂系数一致和光伏6需要保持三相功率平衡，使得二者同时存在较高弃光率，而其他光伏基本不需要弃光。在本文控制策略中，虽然弃光也主要来自光伏5和光伏6，但是光伏5的弃光程度显著大于光伏6。尤其是在0～24 h之间，光伏5的有功出力几乎降至0，而光伏6与原始场景相比却变化很小。这主要是因为光伏6为三相系统，而过电压问题主要发生在a相，为了治理a相过电压并保持光伏6三相功率平衡，就需要同时降低b和c相有功功率，这会增大全系统的弃光率，而光伏5是只接入了a相的单相系统，故可以重点利用其治理a相过电压现象，以降低光伏6的弃光量。这表明本文的调控策略在选择调控对象时具有更高的

针对性，在保证过电压治理效果的同时，尽量降低全系统的弃光率，实现全局的优化控制。

在附录A图A13所示光伏无功出力方面，由于仿真模型仅存在过电压现象，故光伏逆变器的无功出力集中在负值，表示吸收无功功率。在无功出力大小方面，V-Q下垂控制策略和V-Q&V-P组合下垂控制策略接近。两种下垂控制中，V-Q线性控制区的启动电压阈值为1.02 p.u.，故这两种策略在光伏并网点电压大于1.02 p.u.、小于1.07 p.u.的非过电压时段，依然吸收了大量无功功率。本文控制策略能够充分考虑不同光伏并网点的无功功率-电压灵敏度，在光伏高发时段，有针对性地选择位于线路中下游的光伏4～6吸收无功功率、抑制过电压，从而使得全系统的无功使用量得到了大幅降低。同时，对比光伏4～6的有功和无功功率（如120～168 h期间）可知，其均能够实现优先利用无功功率进行调压，只有在无功功率达到饱和时，才会启用有功功率抑制过电压。

4.3.2　惩罚系数的影响

图3(a)为本文所提策略在不同惩罚系数下的电压控制效果，其中，箱线图为不同惩罚系数时，系统中全部节点在整个仿真期间电压的分布情况；而折线图表示不同惩罚系数时，全体节点出现过电压的总次数。惩罚系数为0时，相当于目标函数中不对无功出力进行惩罚；而惩罚系数取∞时，相当于仅使用有功功率进行调压。首先，从箱线图可以看出，不同惩罚系数下，节点电压分布基本一致，整体位于1.07 p.u.以下，仅少量离群值大于1.07 p.u.，但依然小于1.08 p.u.。其次，从过电压总次数折线图中可以看出，在惩罚系数大于0.2后，节点过电压总次数基本稳定在30次附近，表明本文所提控制策略的电压调控效果对惩罚系数不敏感，具有较高的稳定性。

但是，当惩罚系数不同时，本文所提策略的弃光电量和吸收的无功电量会有显著差别，如图3(b)所示。从图中可以看出，弃光量和吸收的无功电量对惩罚系数较为敏感，且变化趋势相反。惩罚系数越大，表示无功使用量对目标函数影响越大，更倾向于使用有功功率进行调压，导致弃光电量增大，吸收的无功电量减小。过大的无功功率不仅会增加不必要的无功补偿，而且可能引起系统损耗的增加。因此，需要折中选择惩罚系数，且不能使其过于接近0，本文取0.2。

4.3.3　弃光公平性分析

户用光伏的所有权通常为居民自身所有，对实际发电量较为敏感。当不考虑弃光公平性时，会导致线路末端光伏的弃光量远大于线路首端，如附录A图A12所示。为了保证公平性，在优化模型中可以要求不同光伏之间弃光率保持一致，即将式(9)修改为式(16)，其他条件保持不变，再次进行仿真实验。

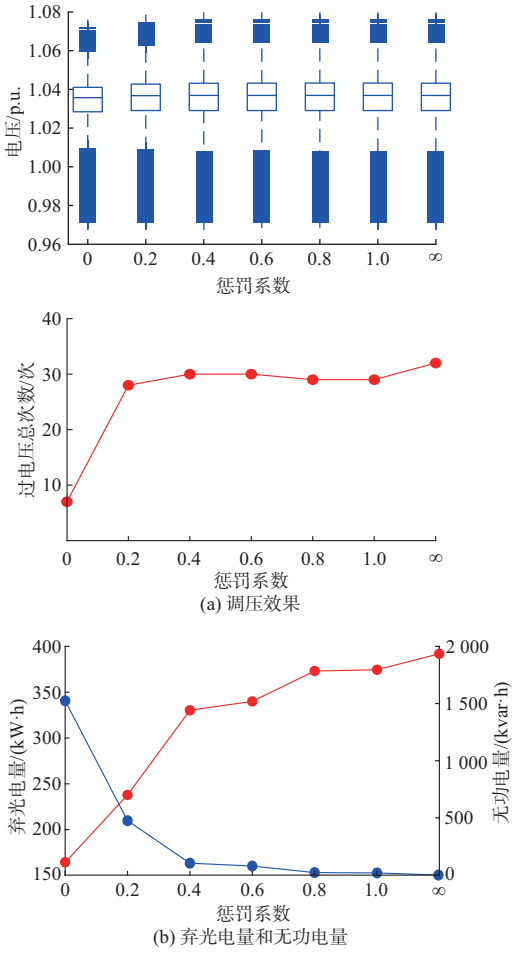

图3　惩罚系数对调压效果和光伏出力的影响
Fig. 3　Influence of penalty coefficients on voltage regulation effect and photovoltaic output

$$\begin{cases} P_{\mathrm{PV},n}=(1-\gamma)P_{\mathrm{PV},n,\max} \\ 0\leqslant\gamma\leqslant 1 \end{cases} \tag{16}$$

式中：γ为全体光伏统一采用的弃光率。

附录A图A14为考虑弃光公平性时光伏有功和无功出力的结果。从图中可以看出，各光伏的有功出力一致，证明实现了公平弃光的目的。但是，与附录A图A12中不考虑弃光公平性的结果相比，附录A图A14中仅光伏5的有功出力得到了明显增加，而其他光伏的出力均显著下降。在无功功率方面，除光伏1和光伏3外，其他光伏吸收的无功功率也显著增加。

进一步，对比不同策略下过电压节点数、过电压

总次数、最大电压、弃光电量、无功电量等指标，如图4所示。可以看出，在电压控制效果方面，本文所提调控策略无论是否考虑弃光公平性，均能有效治理过电压问题，取得基本相同的结果，但在弃光率和无功吸收量方面差别显著。当考虑弃光公平性时，弃光电量增加了329.1 kW·h，甚至大于*V*-*Q*&*V*-*P*组合下垂控制策略；无功吸收量增加了648.0 kvar·h，但依然远小于*V*-*Q*&*V*-*P*组合下垂控制策略。这表明提高不同光伏之间消纳公平性会以降低整个系统的光伏消纳总量为代价。

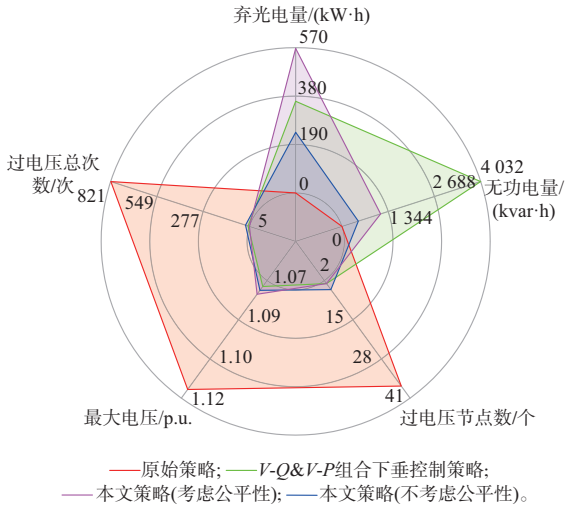

图4　不同调控策略的结果对比
Fig. 4　Comparison of results with various regulation strategies

5　结语

针对含高比例分布式光伏的低压有源配电网所面临的过电压问题及参数缺失的实际工况，本文提出了一种数据驱动的电压在线调控策略。通过算例验证和分析，得出以下结论：

1）通过L2-RLS-λ实现了低压有源配电网节点电压-功率方程中参数的在线辨识与更新。该方法不仅解决了在参数缺失条件下系统节点电压的估计问题，而且具备在线更新能力，从而提高了有源配电网动态变化时电压的估计精度。

2）所提电压调控策略基于无功优先原则，可有效解决过电压问题并实现光伏最大化消纳。该策略具有实现简单、计算复杂度低的优势，适合计算资源受限场景，且支持实时在线运行，能够快速响应光伏出力波动及负荷变化带来的不确定性。

3）在满足过电压治理需求的同时，若要求不同户用光伏实现公平弃光，将导致整个系统消纳总量下降。因此，后续研究须关注设计合适的激励政策，通过经济刺激等手段，适当补偿末端光伏的弃光损失，以进一步提高全系统的光伏消纳量。

附录见本刊网络版，点击http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20250217003，或扫描英文摘要后二维码，可阅读全文。

参 考 文 献

[1] 国家能源局.2024年前三季度光伏发电建设情况[EB/OL].[2024-12-13]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/01/c_1310787081.htm.
National Energy Administration. Construction of photovoltaic power generation in the first three quarters of 2024[EB/OL].[2024-12-13]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/01/c_1310787081.htm.

[2] 杨龙月，任烜辰，蔡智鹏，等.高光伏渗透率配电网电压控制策略研究综述[J].电网技术，2024，48(12)：5056-5070.
YANG Longyue, REN Xuanchen, CAI Zhipeng, et al. Review on voltage control strategies for high PV penetration distribution networks[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 5056-5070.

[3] 栗峰，丁杰，周才期，等.新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J].电网技术，2024，48(1)：184-199.
LI Feng, DING Jie, ZHOU Caiqi, et al. Key technologies of large-scale grid-connected operation of distributed photovoltaic under new-type power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 184-199.

[4] 姜涛，张东辉，李雪，等.含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制[J].电力自动化设备，2021，41(9)：102-109.
JIANG Tao, ZHANG Donghui, LI Xue, et al. Distributed optimal control of voltage in active distribution network with distributed photovoltaic [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 102-109.

[5] 肖传亮，彭克，陈佳佳，等.基于多利益主体划分的配电网互动博弈电压优化控制[J/OL].电网技术[2024-12-13].https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1783.
XIAO Chuanliang, PENG Ke, CHEN Jiajia, et al. Multiple stakeholder partition based interactive-game voltage control for distribution networks[J/OL]. Power System Technology[2024-12-13]. https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1783.

[6] 苏向敬，彭赫，米阳，等.基于线性规划的中低压不平衡配电网电压无功实时优化[J].电网技术，2023，47(11)：4719-4731.
SU Xiangjing, PENG He, MI Yang, et al. Linear programming-based real-time volt-var optimization of unbalanced MV-LV distribution networks[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4719-4731.

[7] 杜红卫，尉同正，夏栋，等.基于集群动态划分的配电网无功电压自律-协同控制[J].电力系统自动化，2024，48(10)：171-181.
DU Hongwei, WEI Tongzheng, XIA Dong, et al. Reactive voltage self-regulation and coordination control in distribution networks based on cluster dynamic partition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 171-181.

[8] NOUSDILIS A I, KRYONIDIS G C, KONTIS E O, et al.

An exponential droop control strategy for distributed energy storage systems integrated with photovoltaics [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3317-3328.

[9] GERDROODBARI Y Z, RAZZAGHI R, SHAHNIA F. Decentralized control strategy to improve fairness in active power curtailment of PV inverters in low-voltage distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2282-2292.

[10] ROSTAMI S M, HAMZEH M, NAZARIPOUYA H. Distributed cooperative reactive power control of PV systems with dynamic leader [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(6): 8972-8982.

[11] 张博，唐巍，蔡永翔，等．基于一致性算法的户用光伏逆变器和储能分布式控制策略[J]．电力系统自动化，2020，44(2)：86-94.
ZHANG Bo, TANG Wei, CAI Yongxiang, et al. Distributed control strategy of residential photovoltaic inverter and energy storage based on consensus algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 86-94.

[12] 祝泳琪，刘友波，唐志远，等．基于数据驱动预测控制的有源配电网电压控制策略[J]．电力系统自动化，2024，48(20)：100-108.
ZHU Yongqi, LIU Youbo, TANG Zhiyuan, et al. Voltage control strategy for active distribution network based on data-enabled predictive control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(20): 100-108.

[13] 杨浩，王佳怡，易文飞，等．知识-数据融合驱动的配电网光伏逆变器电压/无功优化自适应控制[J/OL]．中国电机工程学报[2024-12-05]．https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241838.
YANG Hao, WANG Jiayi, YI Wenfei, et al. Hybrid knowledge-data driven adaptive voltage/var optimization control of photovoltaic inverters in distribution networks [J/OL]. Proceedings of the CSEE[2024-12-05]. https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241838.

[14] 全欢，彭显刚，刘涵予，等．基于深度强化学习的配电网实时电压优化控制方法[J]．电网技术，2023，47(5)：2029-2039.
QUAN Huan, PENG Xiangang, LIU Hanyu, et al. Voltage optimal control of distribution network based on deep reinforcement learning [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2029-2039.

[15] 徐杰，高红均，王仁浚，等．面向三相配电网电压控制的物理模型辅助式深度强化学习方法[J]．电网技术，2025，49(5)：2137-2146.
XU Jie, GAO Hongjun, WANG Renjun, et al. A physical model assisted deep reinforcement learning approach for voltage control in three-phase distribution networks [J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 2137-2146.

[16] 冯昌森，汤飞霞，王国烽，等．基于融合经验安全强化学习的配电网电压控制[J]．电力系统自动化，2025，49(8)：169-177.
FENG Changsen, TANG Feixia, WANG Guofeng, et al. Volt-VAR control for distribution network based on safe reinforcement learning with mixed experiences [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 169-177.

[17] 吉亚娟，王江波．基于在线潮流反馈优化的配电网光伏电源功率公平分配策略[J]．电网技术，2024，48(11)：4503-4513.
JI Yajuan, WANG Jiangbo. Fair distribution strategy for photovoltaic power in distribution networks based on online power flow feedback optimization [J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4503-4513.

[18] 钱立群，魏卿，胡鹏飞，等．基于数据驱动预测控制的低感知度配电网在线无功优化方法[J/OL]．电力系统自动化[2025-01-27]．https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250326.2056.006.html.
QIAN Liqun, WEI Qing, HU Pengfei, et al. Online reactive power optimization method based on data-driven predictive control for low situational awareness distribution network [J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2025-01-27]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250326.2056.006.html.

[19] CAO D, ZHAO J B, HU W H, et al. Model-free voltage control of active distribution system with PVs using surrogate model-based deep reinforcement learning [J]. Applied Energy, 2022, 306: 117982.

[20] PEI Y S, YE K T, ZHAO J B, et al. Visibility-enhanced model-free deep reinforcement learning algorithm for voltage control in realistic distribution systems using smart inverters [J]. Applied Energy, 2024, 372: 123758.

[21] ZABIHINIA GERDROODBARI Y, PENGWAH A B, RAZZAGHI R, et al. A method to control distributed energy resources in distribution networks using smart meter data [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153: 109293.

[22] DEAKIN M, GREENWOOD D, WALKER S, et al. Hybrid European MV-LV network models for smart distribution network modelling [C]// 2021 IEEE Madrid PowerTech, June 28-July 2, 2021, Madrid, Spain.

[23] 张勇军，羿应棋，李立涅，等．双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]．电力系统自动化，2022，46(22)：1-12.
ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.

[24] 国家能源局．关于印发《分布式光伏发电开发建设管理办法》的通知[EB/OL]．[2025-02-08]．https://www.nea.gov.cn/20250123/112c5b199c5f45dd8e7ac93c9f5e4eaf/c.html.
National Energy Administration. Notice on the issuance of administrative measures for the development and construction of distributed photovoltaic power generation [EB/OL]. [2025-02-08]. https://www.nea.gov.cn/20250123/112c5b199c5f45dd8e7ac93c9f5e4eaf/c.html.

[25] 申亚涛，谷紫文，李文美，等．基于电压和功率数据的有源低压台区用户相别辨识方法[J]．电力系统自动化，2024，48(24)：145-154.
SHEN Yatao, GU Ziwen, LI Wenmei, et al. Phase identification method for customers in active low-voltage transformer area based on voltage and power data [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 145-154.

[26] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.电能质量 供电电压偏差:GB/T 12325—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality— deviation of supply voltage: GB/T 12325—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
[27] LI X S, WEN H Q, ZHU Y X, et al. A novel sensorless photovoltaic power reserve control with simple real-time MPP estimation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7521-7531.
[28] DataforLVADNControlPaper. mat [EB/OL]. [2025-02-12]. https://drive. google. com/file/d/188mKg3oYa83mgvoX7zvl1hOB5-KAftTA/viewusp=sharing&usp=embed_facebook.

申亚涛(1991—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统优化调度。E-mail:hnusyt@hnu.edu.cn
王子鉴(1998—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:智能电网自适应控制与优化。E-mail:zijianwang@hnu.edu.cn
谷紫文(1995—),男,博士研究生,主要研究方向:电力大数据分析与建模、智能信息处理。E-mail:ziwengu@hnu.edu.cn

(编辑 王梦岩)

Data-driven Online Voltage Regulation Strategy for Low-voltage Active Distribution Networks

SHEN Yatao, WANG Zijian, GU Ziwen, HUANG Chun
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 470082, China)

Abstract: Low-voltage active distribution networks with a high proportion of rooftop photovoltaic face severe overvoltage issues. Simultaneously, the lack of topological structure and line parameters further complicates voltage optimization and regulation. To address this, a data-driven online voltage regulation strategy is proposed. First, a data-driven method is employed to online identify and update the parameters in the system node voltage-power equation, providing a foundation for dynamically estimating node voltages. Then, a voltage optimization and regulation model aimed at maximizing photovoltaic accommodation is established. Based on the model solution results, while controlling the photovoltaic inverters to track reactive power commands, dynamic limiting of active power output is implemented to achieve effective voltage regulation. Case results demonstrate that this strategy not only resolves the issue of node voltage estimation without an electrical model but also effectively achieves overvoltage mitigation following the principle of reactive power priority, maximizing photovoltaic accommodation and validating the effectiveness of the proposed strategy.

This work is supported by Science and Technology Innovation Major Project of Hunan Province (No. 2020GK1010).

Key words: photovoltaic; active distribution network; voltage regulation; accommodation; overvoltage mitigation