

新型配电网三相有功-无功功率多时间尺度滚动协同电压优化控制

何明君¹, 文贤馗¹, 周科¹, 李晓江²

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵阳 550002; 2. 贵州电网有限责任公司六盘水供电局, 贵州 六盘水 553001)

摘要: 针对极高比例分布式光伏规模化接入配电网引起严重反向潮流过载及电压越限问题, 考虑配电系统网络复杂阻抗下有功和无功功率与电压强耦合特性, 提出了有功-无功功率协同电压支撑的优化控制方法, 实现了分布式新能源及储能兼顾低运行成本与高电能质量的多目标协同优化运行。首先提出了基于有功-无功功率耦合的三相潮流电压模型预测控制滚动优化方法, 并通过多周期化电压模型预测控制架构, 有效减少决策变量及约束数量, 在保证求解精度的同时提升求解效率, 实现了在线电压控制问题的快速求解。进一步, 针对强耦合的三相潮流模型, 提出了基于不动点迭代的预迭代方法, 并将多步迭代分布在滚动优化过程中实现不增加单时刻模型的迭代次数下大幅提升了模型求解精度。最后通过接入极高比例光伏的 IEEE 13 节点系统验证了所提控制系统在抑制电压越限的有效性。

关键词: 新型配电网; 高比例光伏; 有功功率-无功功率协同; 滚动优化; 电压控制

Three-Phase Active-Reactive Power Multi-Time Scale Rolling Collaborative Voltage Optimization Control of New Distribution Networks

HE Mingjun¹, WEN Xiankui¹, ZHOU Ke¹, LI Xiaojiang²

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. Liupanshui Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Liupanshui, Guizhou 553001, China)

Abstract: Ultra-high-penetration distributed photovoltaics (PV) in distribution networks pose significant challenges, including severe reverse power flow overloads and voltage violations. Addressing the strong coupling characteristics between active-reactive power (P/Q) and voltage under complex network impedances of distribution networks, a active-reactive power coordinated voltage support optimization method is proposed. This method achieves multi-objective collaborative optimization operation of distributed renewable energy and energy storage, balancing low operational costs with high power quality. Firstly, a rolling optimization method for three-phase power flow voltage model predictive control (MPC) based on active-reactive power coupling is proposed. Via a multi-period voltage MPC framework, the number of decision variables and constraints is effectively reduced, which improves solution efficiency while ensuring solution accuracy and achieves fast solution of the online voltage control problem. Furthermore, a pre-iterative method based on fixed-point iteration is proposed for the strongly coupled three-phase power flow model. By distributing multi-step iterations across the rolling optimization horizon, the solution accuracy is significantly improved without increasing the number of per-step iteration. Finally, the effectiveness of the proposed control system in suppressing voltage exceeding limits is verified by integrating an IEEE 13-node system with ultra-high-penetration PV.

Key words: new distribution networks; high proportion of photovoltaics; active-reactive power coordination; rolling optimization; voltage control

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFE0208100); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20222258)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China(2024YFE0208100); the Science and Technology Projects of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GZKJXM20222258).

0 引言

“双碳”背景下新能源加速开发促使了以新能源为主体的新型电力系统框架的形成^[1-3]。其中, 大规模高比例分布式光伏接入了电网^[4-6], 反向潮流现象显著加剧, 电压越限问题日益突出^[7-9]。同时终端用户对于用电质量的期望与要求日益提升, 配电网电能质量问题已经成为新型电力系统的热点研究领域之一。

不同于传统高压输电线路, 在结构更为复杂、阻抗比更为多样的配电网中功率解耦的差异程度显著增大, 亟待研发一种基于配网阻抗特性的分布式光伏电压主动支撑方法, 以保障电力系统的稳定运行与电能质量的可靠提升。

在分布式光伏接入配电网的电压控制研究领域, 国内外众多学者聚焦于无功功率与电压之间的内在关联^[10-12], 针对新能源出力不确定性特征^[13-14], 学者基于系统分析在分布式电源的规划运行层面予以综合考量^[15], 通过对负荷及光伏功率进行精准预测实现基于无功功率调节的电压管控策略^[16], 部分研究进一步考虑了馈线层与变电站之间的信息交互机制^[17], 旨在优化配电网无功功率-电压控制(voltage and var control, VCC)过程中所暴露出的灵活性不足问题^[18]。文献[19]提出了考虑不同电压等级和三相不平衡配电网的电压及无功功率优化方法。然而, 上述研究多局限于无功功率对电压的单一影响维度, 而在配网阻抗特性背景下电阻与电抗的比值通常接近于1甚至更大。因此有功功率对电压幅值的影响效应逐渐凸显并占据重要地位, 无法类比高压输电线路进行近似处理。因此诸多学者进一步将有功功率对电压的影响纳入考量范畴。文献[20]兼顾了有功功率和无功功率对电压的协同支撑效应, 但侧重光伏接入节点的电压波动情况, 忽略了整体配电网电压分布特性。文献[21]提出的有功-无功功率协调电压控制方法其控制目标着眼于电压偏差指标, 忽视了经济成本因素对配电网运行的综合影响。文献[22-23]构建了日前日中联合优化模型在一定程度上提升了电压控制的时效性与精准性, 但其光伏有功出力设定相对保守, 缺乏极端工况如高比例光伏接入电压越限场景下配电网电压稳定性的保障机制研究。文献[24]提出了依据电压区间实施有功-无功功率分区控制的方法,

在实际运行过程中易出现无功功率配置相对于有功功率相对过剩的现象, 导致资源配置失衡, 影响配电网的整体运行效率与经济性。文献[25]基于模型预测控制(model predictive control, MPC)提出了一种有源配电网协调控制方法, 但是未考虑预测数据实现全时段运行最优。

综上, 针对高比例分布式光伏接入配网后电压越限的问题, 目前的研究尚未充分挖掘有功-无功功率协同作用下电压控制的潜力, 因此, 本文创新性地提出了一种分布式光伏有功-无功功率协同支撑配电网的电压控制策略来应对因光伏高渗透率接入所引发的电压越限难题, 进而提升配电网的运行稳定性与电能质量。表1总结了所提出方法和现有研究的差异, 本文的主要创新点如下。

1)提出了基于不同时间尺度的电压全局优化与实时滚动优化方法, 采用有功-无功功率耦合的电压多相配电网线性潮流方程, 实现有功-无功功率协同的电压支撑;

2)基于多次不动点迭代方法与预迭代技术将潮流多次迭代分布在滚动模型中, 在不增加迭代次数情况下提高线性化模型精度及效率;

3)构建多周期的滚动优化模型, 在时域内对决策变量及约束条件降维, 在保证求解精度的前提下提升了求解速度。

表 1 不同方法的特点总结

Tab. 1 Summary on features of different methods

研究	有功-无功功率 协同优化	三相不平衡	滚动优化	全时段优化
文献[16]	×	×	×	√
文献[17]	√	×	×	√
文献[18]	×	×	√	√
文献[19]	×	√	×	×
文献[20]	√	×	×	×
文献[21]	√	×	×	√
文献[22]	√	×	√	√
文献[25]	√	×	√	×
本文	√	√	√	√

1 有功-无功功率耦合下的配电网全局电压协同优化模型

在电力系统中由经典 π 形等值输电线路模型可见节点电压的动态变化特性受到源-荷功率分布格

局以及线路阻抗特性的共同作用与影响。由于配电网线路的自身特性,除无功功率外有功功率与电压的耦合不可忽视。同时在分布式光伏于中午时段处于大发状态时,较高水平的有功功率输出甚至可能导致有功功率反向过载。该工况下,有功功率的分布状况对电压水平产生了极为显著的影响,直接导致配电线路末端电压出现抬升现象,进而引发图 1 所示配电网全局范围内的电压越限问题。

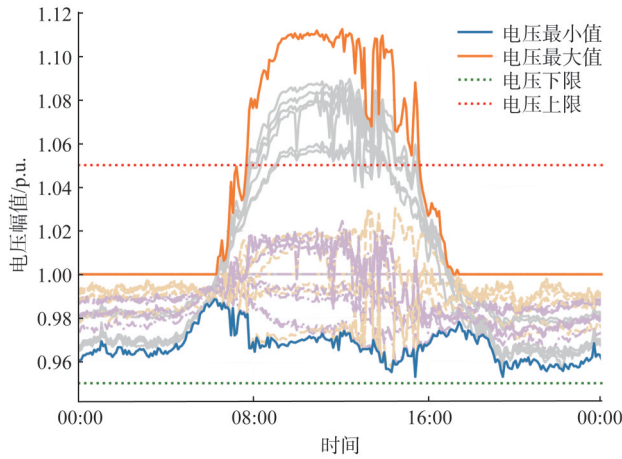


图 1 电压越限曲线

Fig. 1 Voltage out-of-limit curves

基于上述分析可知,配电网电压优化需要充分考虑有功功率和无功功率的耦合特性,不仅需要对象以及光伏功率在空间与时间维度上的分布状况进行精准预测,还需有效利用分布式光伏逆变器所具备的功率快速调节能力,基于上述考量本文搭建了新型电力系统配电网电压优化模型如图 2 所示。

该电压优化模型以一个高比例新能源配电网为优化主体,调节分布式光伏的有功-无功功率出力,在抑制电压越限的基础上实现配电网整体运行最优。

1.1 多维效用并合模型的多目标函数

在实施电压优化控制的过程中,本文充分考量配电网运行的经济性以最大程度地实现新能源的消纳并且保障系统的电能质量。因此本文设计了购电成本、弃光惩罚以及电压偏差多个目标函数。购电成本是保证负荷供应基础上考虑系统整体从上游电网购电量最少;弃光惩罚是响应国家新能源战略对分布式光伏用户尤其是扶贫光伏的弃光补偿;电压偏差是在电压安全的基础上进一步提升电能质量。

考虑到子目标函数的量纲差异,为了进行统一

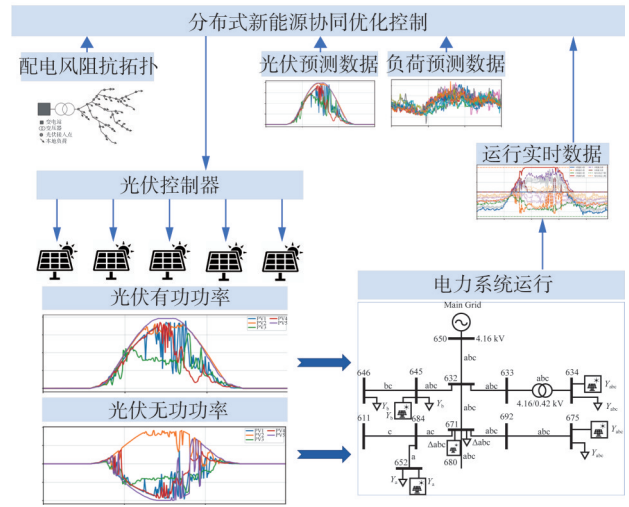


图 2 电压优化模型框架

Fig. 2 Voltage optimization model framework

的度量与综合评估并精准设计权重,本文对各个指标进行了归一化处理,进而构建了基于多维效用并合模型的多目标函数。

$$\begin{aligned} \min f_i(\mathbf{p}_t, \mathbf{q}_t, \mathbf{v}_t) &= W_t(u_{1,t}, u_{2,t}, u_{3,t}) \\ &= \kappa_1(C_t^{\text{import}} \cdot P_t^{\text{import}} - C_t^{\text{export}} \cdot P_t^{\text{export}}) + \\ &\quad \kappa_2\left(\sum_{i=1}^n \lambda(P_{i,t}^{\text{pre}} - P_{i,t}^{\text{pv}})\right) + \kappa_3\left(\sum_{i=1}^N |V_{i,t} - V_N|\right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $u_{1,t}$ 、 $u_{2,t}$ 、 $u_{3,t}$ 分别为 t 时刻 3 个优化指标的基本效用函数; C_t^{import} 、 C_t^{export} 分别为 t 时刻从上游电网的有功购买价格及出售价格; P_t^{import} 、 P_t^{export} 分别为 t 时刻从上游电网购买的有功功率及出售的有功功率; $P_{i,t}^{\text{pre}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{pv}}$ 分别为 t 时刻第 i 个光伏的三相总预测有功出力及三相总实际有功功率出力; λ 为弃光惩罚系数; n 为光伏数量; $V_{i,t}$ 、 V_N 分别为 t 时刻节点 i 电压幅值及额定值; N 为网络节点数量; W_t 为 t 时刻并和后的效用函数; κ_1 、 κ_2 、 κ_3 为权重系数; $\mathbf{p}_t$ 、 $\mathbf{q}_t$ 、 $\mathbf{v}_t$ 分别为电压优化输入的有功功率、无功功率和电压矩阵,其中电压 $\mathbf{v}_t = f(\mathbf{p}_t, \mathbf{q}_t)$ 是通过潮流计算关于有功、无功功率的非线性函数。

对于一个连续运行的配电系统,考虑其一天内的运行状况,电压优化模型的目标函数是全天所有时刻子目标的总和,具体见式(2)。

$$\min f = \sum_{t \in T} W_t(u_{1,t}, u_{2,t}, u_{3,t}) \quad (2)$$

式中: f 为系统全天优化目标函数; T 为优化时间长度序列。

电压优化模型通过调整分布式光伏的有功-无功功率找到使得目标函数最小的最优解。

1.2 约束条件

1.2.1 交换功率约束

在保障电网整体稳定性的目标导向下, 配电系统与上游电网之间进行交互的有功功率必须严格控制规定的最大值范围之内。

$$0 \leq P_i^{\text{import}} \leq \bar{P}_{\text{import}} \quad (3)$$

$$0 \leq P_i^{\text{export}} \leq \bar{P}_{\text{export}} \quad (4)$$

式中: $\bar{P}_{\text{import}}$ 为从上游电网购买的有功功率最大值;

$\bar{P}_{\text{export}}$ 为向上游电网出售的有功功率最大值。

1.2.2 电压约束

为了保证电压不越限, 对节点电压的幅值进行上下限约束。

$$|\underline{v}| \leq |v_t| \leq |\bar{v}| \quad (5)$$

式中: $|v_t|$ 为 t 时刻节点电压幅值, $|v_t| \in \mathbb{R}$; $|\underline{v}|$ 、 $|\bar{v}|$ 分别为电压幅值的下限和上限。

1.2.3 电流约束

为了保证配电网络的安全运行, 线路通过的电流不能超过最大值。

$$|i_t^{j,k}| \leq |\bar{i}_t^{j,k}| \quad (6)$$

式中: $|i_t^{j,k}|$ 为节点 j 、 k 间支路的电流幅值, $|i_t^{j,k}| \in \mathbb{R}$; $|\bar{i}_t^{j,k}|$ 为电流幅值的上限。

1.2.4 光伏逆变器约束

该约束保证光伏逆变器以有功功率出力为主, 保持高功率因数运行。

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{pv}} \leq P_{i,t}^{\text{prc}} \quad (7)$$

$$\sqrt{(P_{i,t}^{\text{pv}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{pv}})^2} \leq S_i^{\text{rad}} \quad (8)$$

$$\frac{P_{i,t}^{\text{pv}}}{\sqrt{(P_{i,t}^{\text{pv}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{pv}})^2}} \geq \cos \varphi \quad (9)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{pv}}$ 为 t 时刻第 i 个光伏的三相总无功功率; S_i^{rad} 为第 i 个光伏的三相总容量; φ 为最大功率因数角。

1.2.5 潮流约束

$$\begin{bmatrix} P_i^a \\ P_i^b \\ P_i^c \end{bmatrix} = \text{Re} \left[\mathbf{V}_i \odot \left(\sum_{j=1}^N \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{V}_j \right)^* \right] \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} Q_i^a \\ Q_i^b \\ Q_i^c \end{bmatrix} = \text{Im} \left[\mathbf{V}_i \odot \left(\sum_{j=1}^N \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{V}_j \right)^* \right] \quad (11)$$

式中: P_i^a 、 P_i^b 、 P_i^c 分别为节点 i 的 a、b、c 相的有功功率; Q_i^a 、 Q_i^b 、 Q_i^c 为节点 i 的 a、b、c 相的无功功

率; $\mathbf{V}_i = [V_i^a, V_i^b, V_i^c]^T$ 为节点 i 的三相电压向量; $\mathbf{V}_j = [V_j^a, V_j^b, V_j^c]^T$ 为节点 j 的三相电压向量; $\mathbf{Y}_{ij}$ 为节点 i 、 j 间的三相导纳矩阵块; $\odot$ 为逐个元素相乘函数; $(\cdot)^*$ 为共轭计算函数; $\text{Re}[\cdot]$ 为取实部函数; $\text{Im}[\cdot]$ 为取虚部函数。

上述构建了以式(2)为目标函数, 分布式光伏的有功-无功功率为决策变量的, 满足约束式(3)~(11)的全局电压优化模型。

2 电压协同优化的高精度线性化模型

2.1 配网三相潮流约束的线性化

在进行电压优化时, 式(10)和式(11)是非线性方程, 潮流模型高阶复杂, 在实际求解中求解难度大, 此外该潮流方程在构建过程中并未充分考量三相不对称情形, 这一局限性致使其难以适用于多相配电网的实际运行场景。因此, 为有效简化模型, 综合考虑具有一般拓扑结构以及不同负荷模型的不平衡多相配电系统^[26], 该系统包含一个松弛节点以及 N 个三相恒定功率节点, 并全面考虑每个节点所连接的源/荷 Y 连接与三角形连接方式, 基于功率关系可推导出相应的潮流方程。

$$\text{diag}(\Psi^T \mathbf{i}^\Delta) \mathbf{v} + \mathbf{z}^Y = \text{diag}(\mathbf{v}) \mathbf{i}^* \quad (12)$$

$$\mathbf{s}^\Delta = \text{diag}(\Psi \mathbf{v}) \mathbf{i}^{\Delta*} \quad (13)$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{Y}_{L0} \mathbf{v}_0 + \mathbf{Y}_{LL} \mathbf{v} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{i}^\Delta = [\mathbf{i}_1^\Delta, \mathbf{i}_2^\Delta, \dots, \mathbf{i}_N^\Delta]$ 为所有 PQ 节点三角形连接源/荷注入的相-相电流矩阵, $\mathbf{i}^\Delta \in \mathbb{C}^{3N}$; $\mathbf{i}_k^\Delta = [\mathbf{i}_k^{ab}, \mathbf{i}_k^{bc}, \mathbf{i}_k^{ca}]$ 为节点 k 三角形连接源/荷注入的相-相电流矩阵; $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N]$ 为所有 PQ 节点的相-地电压矩阵, $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^{3N}$; $\mathbf{v}_k = [\mathbf{v}_k^a, \mathbf{v}_k^b, \mathbf{v}_k^c]$ 为节点 k 的相-地电压矩阵; $\text{diag}(\cdot)$ 为对角化函数; $\mathbf{i} = [\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \dots, \mathbf{i}_N]$ 为所有 PQ 节点相净注入电流矩阵, $\mathbf{i} \in \mathbb{C}^{3N}$; $\mathbf{i}_k = [\mathbf{i}_k^a, \mathbf{i}_k^b, \mathbf{i}_k^c]$ 为节点 k 源/荷的相净注入电流矩阵; $\mathbf{z}^Y = [\mathbf{z}_1^Y, \mathbf{z}_2^Y, \dots, \mathbf{z}_N^Y]$ 为所有 PQ 节点 Y 连接源/荷注入的三相复功率矩阵, $\mathbf{z}^Y \in \mathbb{C}^{3N}$; $\mathbf{z}_k^Y = [\mathbf{z}_k^a, \mathbf{z}_k^b, \mathbf{z}_k^c]$ 为节点 k 的 Y 形连接源/荷注入的三相复功率矩阵; $\mathbf{z}^\Delta = [\mathbf{z}_1^\Delta, \mathbf{z}_2^\Delta, \dots, \mathbf{z}_N^\Delta]$ 为所有 PQ 节点三角形连接源/荷注入的三相复功率矩阵, $\mathbf{z}^\Delta \in \mathbb{C}^{3N}$; $\mathbf{z}_k^\Delta = [\mathbf{z}_k^{ab}, \mathbf{z}_k^{bc}, \mathbf{z}_k^{ca}]$ 为节点 k 三角形连接源/荷注入的三相复功率矩阵; $\mathbf{v}_0 = [\mathbf{v}_0^a, \mathbf{v}_0^b, \mathbf{v}_0^c]$ 为松弛节点相-地电压矩阵, $\mathbf{v}_0 \in \mathbb{C}^3$; Ψ 为 $3N \times 3N$ 对角模块矩阵, 实现相-相电流到相净注入电流的转换。

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Lambda & & \\ & \ddots & \\ & & \Lambda \end{bmatrix}, \Lambda = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

松弛节点和 N 个 PQ 节点之间的三相导纳矩阵为:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{00} & \mathbf{Y}_{0L} \\ \mathbf{Y}_{L0} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{3(N+1) \times 3(N+1)} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{Y}_{00}$ 为松弛节点自导纳矩阵; $\mathbf{Y}_{0L}$ 和 $\mathbf{Y}_{L0}$ 分别为松弛节点和 PQ 节点间的互导纳矩阵; $\mathbf{Y}_{LL}$ 为 PQ 节点的自导纳矩阵。

通过简单的代数运算, 将式(13)和式(14)代入到式(12)中, 可得到电压的不动点方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{g}(\mathbf{v}) \\ &= \mathbf{w} + \mathbf{Y}_{LL}^{-1} \left(\text{diag}(\mathbf{v}^*)^{-1} \mathbf{z}^* + \Psi^T \text{diag}(\Psi \mathbf{v}^*)^{-1} \mathbf{z}^* \right) \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $\mathbf{w} = -\mathbf{Y}_{LL}^{-1} \mathbf{Y}_{L0} \mathbf{v}_0$ 为 PQ 节点无注入功率时的电压。

将 PQ 节点的 Y 连接和三角形连接的源/荷注入三相复功率和电压初始值 $\mathbf{v}_i$ 代入到方程(17)中进行一次迭代, 得到电压的线性化方程^[27]。

$$\mathbf{v} = \mathbf{T}^Y(\mathbf{p}^Y, \mathbf{q}^Y) + \mathbf{T}^\Delta(\mathbf{p}^\Delta, \mathbf{q}^\Delta) + \mathbf{w} \quad (18)$$

$$\mathbf{T}^Y = (\mathbf{Y}_{LL}^{-1} \text{diag}(\mathbf{v}_i^*)^{-1}, -\mathbf{j} \mathbf{Y}_{LL}^{-1} \text{diag}(\mathbf{v}_i^*)^{-1}) \quad (19)$$

$$\mathbf{T}^\Delta = (\mathbf{Y}_{LL}^{-1} \Psi^T \text{diag}(\Psi \mathbf{v}_i^*)^{-1}, -\mathbf{j} \mathbf{Y}_{LL}^{-1} \Psi^T \text{diag}(\Psi \mathbf{v}_i^*)^{-1}) \quad (20)$$

式中: 系数矩阵 $\mathbf{T}^Y, \mathbf{T}^\Delta \in \mathbb{C}^{3N \times 6N}$; $\mathbf{p}^Y = [\mathbf{p}_1^Y, \mathbf{p}_2^Y, \dots, \mathbf{p}_N^Y]$ 、 $\mathbf{q}^Y = [\mathbf{q}_1^Y, \mathbf{q}_2^Y, \dots, \mathbf{q}_N^Y]$ 分别为所有 PQ 节点 Y 连接源/荷注入的三相有功和无功功率矩阵, $\mathbf{p}^Y, \mathbf{q}^Y \in \mathbb{R}^{3N}$; $\mathbf{p}_k^Y = [\mathbf{p}_k^a, \mathbf{p}_k^b, \mathbf{p}_k^c]$ 、 $\mathbf{q}_k^Y = [\mathbf{q}_k^a, \mathbf{q}_k^b, \mathbf{q}_k^c]$ 分别为节点 k 的 Y 连接源/荷注入的三相有功和无功功率矩阵; $\mathbf{p}^\Delta = [\mathbf{p}_1^\Delta, \mathbf{p}_2^\Delta, \dots, \mathbf{p}_N^\Delta]$ 、 $\mathbf{q}^\Delta = [\mathbf{q}_1^\Delta, \mathbf{q}_2^\Delta, \dots, \mathbf{q}_N^\Delta]$ 分别为所有 PQ 节点三角形连接源/荷注入的三相有功和无功功率矩阵, $\mathbf{p}^\Delta, \mathbf{q}^\Delta \in \mathbb{R}^{3N}$; $\mathbf{p}_k^\Delta = [\mathbf{p}_k^{ab}, \mathbf{p}_k^{bc}, \mathbf{p}_k^{ca}]$ 、 $\mathbf{q}_k^\Delta = [\mathbf{q}_k^{ab}, \mathbf{q}_k^{bc}, \mathbf{q}_k^{ca}]$ 分别为节点 k 三角形连接源/荷注入的三相有功和无功功率矩阵。

再利用下面向量函数绝对值的求导法则。

$$\frac{\partial |f(x)|}{\partial x} = \frac{1}{|f(x)|} \Re \left\{ \overline{f(x)} \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right\} \quad (21)$$

式中: $f(x)$ 为给定向量函数; $\Re(\cdot)$ 为对复数取实部函数。

将电压公式(18)代入, 即可得到电压幅值关于节点有功和无功功率的线性化方程。

$$|\mathbf{v}| = \mathbf{M}^Y(\mathbf{p}^Y, \mathbf{q}^Y) + \mathbf{M}^\Delta(\mathbf{p}^\Delta, \mathbf{q}^\Delta) + |\mathbf{w}| \quad (22)$$

$$\mathbf{M}^Y = \frac{\partial |\mathbf{v}|}{\partial (\mathbf{p}^Y, \mathbf{q}^Y)} = \text{diag}(|\mathbf{v}_i|)^{-1} \Re(\text{diag}(\mathbf{v}_i^*) \mathbf{T}^Y) \quad (23)$$

$$\mathbf{M}^\Delta = \frac{\partial |\mathbf{v}|}{\partial (\mathbf{p}^\Delta, \mathbf{q}^\Delta)} = \text{diag}(|\mathbf{v}_i|)^{-1} \Re(\text{diag}(\mathbf{v}_i^*) \mathbf{T}^\Delta) \quad (24)$$

式中系数矩阵 $\mathbf{M}^Y, \mathbf{M}^\Delta \in \mathbb{R}^{3N \times 6N}$ 。

已知节点电压方程和系统导纳矩阵可以得到 PQ 节点间的支路电流方程, 再通过式(21)可以写出线电流幅值和松弛节点的三相功率的线性方程。

$$|\mathbf{i}| = \mathbf{J}^Y(\mathbf{p}^Y, \mathbf{q}^Y) + \mathbf{J}^\Delta(\mathbf{p}^\Delta, \mathbf{q}^\Delta) + \mathbf{m} \quad (25)$$

$$\mathbf{P}_0 = \Re(\mathbf{G}^Y(\mathbf{p}^Y, \mathbf{q}^Y)) + \Re(\mathbf{G}^\Delta(\mathbf{p}^\Delta, \mathbf{q}^\Delta)) + \mathbf{e} \quad (26)$$

式中: $\mathbf{i}_i$ 为电流初始解; 系数矩阵 $\mathbf{J}^Y, \mathbf{J}^\Delta \in \mathbb{R}^{3N \times 6N}$; $\mathbf{m} = |\mathbf{Y}_{LL} \mathbf{w} + \mathbf{Y}_{L0} \mathbf{v}_0|$ 为节点无注入功率时的电流幅值; 系数矩阵 $\mathbf{G}^Y, \mathbf{G}^\Delta \in \mathbb{R}^{3 \times 6N}$; $\mathbf{e}$ 为节点注入功率前松弛节点与上游电网交换有功三相总功率, $\mathbf{e} \in \mathbb{R}^3$ 。

2.2 线性化精度提升的迭代求解

系统潮流的线性方程是基于式(17)的不动点方程进行单次迭代得到, 文献[27]已经证明其局部收敛性, 并且给出功率注入安全范围, 但是单次迭代计算得到的理论电压值和实际电压值存在一定偏差, 且当光伏出力波动距离设定点越远, 偏差越大。为了保证电压求解的精度, 本文通过不动点方程进行多次迭代求解, 该不动点方程呈现出线性收敛的优良特性, 在迭代过程中能够以相对较快的速度向精确值逼近。电压优化模型迭代求解过程如图 3 所示。

迭代求解即上一次优化得到的光伏有功-无功出力作为下一次优化的系统初始运行状态, 迭代步骤如下。

1) 步骤一: 初始化

基于当前光伏出力与负荷三相功率预测, 计算初始电压 $\mathbf{V}^{(0)}$;

2) 步骤二: 灵敏度更新

根据 $\mathbf{V}^{(i)}$ 更新 $\mathbf{M}^{Y(i)}, \mathbf{M}^{\Delta(i)}$;

3) 步骤三: 优化求解

以目标函数最小化为目标, 求解 $\Delta \mathbf{P}^{(i)}$ 与 $\Delta \mathbf{Q}^{(i)}$;

4) 步骤四: 光伏出力修正

$$\mathbf{P}^{(i)} = \mathbf{P}^{(i-1)} + \Delta \mathbf{P}^{(i)}$$

$$\mathbf{Q}^{(i)} = \mathbf{Q}^{(i-1)} + \Delta \mathbf{Q}^{(i)}$$

5) 步骤五: 收敛判断

若迭代次数达到最大设定值或者 $\Delta \mathbf{P}^{(i)}$ 与 $\Delta \mathbf{Q}^{(i)}$ 小于设定阈值, 则输出三相功率控制结果; 否则返

回步骤一。

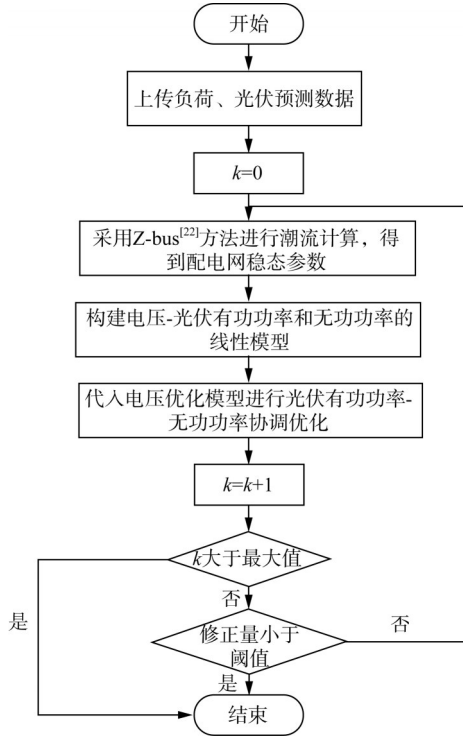


图3 光伏控制流程图

Fig. 3 Flowchat of photovoltaic control process

3 基于模型预测控制的电压滚动优化方法

上述全局电压优化模型虽然能得到全局系统运行光伏的有功-无功功率指令，但在光伏高渗透的配电网中，由于光伏和负荷预测的不确定性，致使先前计算得出的优化指令难以精准适配系统的实时运行需求，从而丧失了原有的准确性。因此，为有效应对因预测数据与系统实际运行状态随时间动态变化而引发的控制偏差问题，本文基于模型预测控制^[28]的思想提出了一种电压滚动优化方法。

3.1 电压滚动优化和迭代求解

模型预测控制建立被控制系统的离散动力学数学模型，依据当前时刻系统状态以及控制决策预测未来的系统状态，并在此基础上进行实时优化，以达到约束下期望的控制效果。模型预测控制的核心思想包括3个方面：预测模型，滚动优化和反馈校正。

预测模型为超短期的光伏和负荷三相预测功率^[29-30]，受到天气和用电行为等因素的影响，该预测模型呈现出随时间推移而持续更新变化的特性。

不同于全局的电压优化的全时段统一求解，滚

动优化每次只优化一个滚动域时间段的电压，随着滚动域的向后滚动实现电压的滚动优化，将大规模优化问题拆分成小规模优化问题。但是式(22)存在的计算偏差仍然存在，因此仍然采取迭代求解的方法进行求解。但不同于全局电压优化时的迭代求解方式，电压滚动优化通过预迭代方式将多次迭代分布在滚动模型中。滚动域内电压优化模型的目标函数为：

$$\min G = \sum_{t \in T_{\text{roll}}} W_t(u_{1,t}, u_{2,t}, u_{3,t}) \quad (27)$$

式中 T_{roll} 为滚动域时间段。

滚动优化模型如图4所示。对滚动域内的电压进行优化，由于时间序列的特性，后一时刻相较于前一时刻会更晚进入滚动域范围，这一差异直接导致其在迭代求解过程中的迭代次数减少一次。

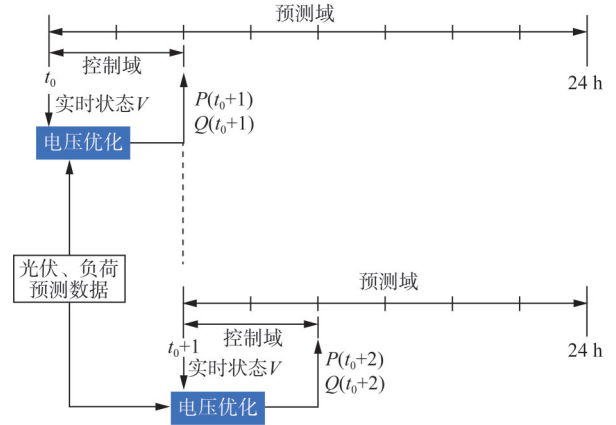


图4 MPC滚动优化模型

Fig. 4 MPC rolling optimization model

$$\begin{bmatrix} p_t^k & q_t^k \\ p_{t+1}^{k-1} & q_{t+1}^{k-1} \\ p_{t+2}^{k-2} & q_{t+2}^{k-2} \\ p_{t+3}^{k-3} & q_{t+3}^{k-3} \end{bmatrix} = \min G \begin{bmatrix} p_t^{k-1} & q_t^{k-1} \\ p_{t+1}^{k-2} & q_{t+1}^{k-2} \\ p_{t+2}^{k-3} & q_{t+2}^{k-3} \\ p_{t+3}^{k-4} & q_{t+3}^{k-4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta p_t & \Delta q_t \\ \Delta p_{t+1} & \Delta q_{t+1} \\ \Delta p_{t+2} & \Delta q_{t+2} \\ \Delta p_{t+3} & \Delta q_{t+3} \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中： p_t^k 、 q_t^k 分别为 t 时刻电压第 k 次优化后的光伏有功和无功三相总功率； Δp_t 、 Δq_t 分别为光伏和负荷预测带来的有功和无功三相功率偏差。

滚动域向后滚动，再次进行电压优化，则有：

$$\begin{bmatrix} p_{t+1}^k & q_{t+1}^k \\ p_{t+2}^{k-1} & q_{t+2}^{k-1} \\ p_{t+3}^{k-2} & q_{t+3}^{k-2} \\ p_{t+4}^{k-3} & q_{t+4}^{k-3} \end{bmatrix} = \min G \begin{bmatrix} p_{t+1}^{k-1} & q_{t+1}^{k-1} \\ p_{t+2}^{k-2} & q_{t+2}^{k-2} \\ p_{t+3}^{k-3} & q_{t+3}^{k-3} \\ p_{t+4}^{k-4} & q_{t+4}^{k-4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta p_{t+1} & \Delta q_{t+1} \\ \Delta p_{t+2} & \Delta q_{t+2} \\ \Delta p_{t+3} & \Delta q_{t+3} \\ \Delta p_{t+4} & \Delta q_{t+4} \end{bmatrix} \quad (29)$$

对比式(28)和(29)可以看出, 每个时刻的电压在离开滚动域时都优化了 k 次, k 为滚动域的时间长度, 其目的在于确保与全局电压优化模型达成等效性。具体而言, k 的取值应当精准地与全局电压优化模型所采用的迭代次数保持一致, 从而在理论层面保障两种优化模型在优化效果上的等价性与可比性。

3.2 滚动优化的等价性

因为配电网络不同时刻优化结果不存在时间前后的耦合, 因此当预测数据相同时, 求全局优化目标的最小值和滚动优化目标的最小值都可以看作是每个时刻优化目标最小值。因此电压滚动优化和电压全局优化方法目标函数上具备等价性。

全局电压优化的目标函数为:

$$\min f_1 = \sum_{t \in T} W_t(u_{1,t}, u_{2,t}, u_{3,t}) \quad (30)$$

滚动电压优化的目标函数为:

$$\min f_2 = \sum_{t \in T_{\text{roll}}} W_t(u_{1,t}, u_{2,t}, u_{3,t}) \quad (31)$$

另一方面, 无论是全局电压优化策略, 抑或是滚动电压优化策略, 在每一个特定时刻, 网络所面临的功率约束条件、电压约束条件、电流约束条件以及光伏约束条件均保持完全一致。因此二者在约束条件上具备等价性。

进一步, 二者的控制变量均为光伏的有功功率与无功功率。而光伏功率在时间维度上不存在耦合关联, 这一特性使得在每个特定时刻控制变量仅需契合该时刻对应的约束条件, 并且通过精准调控促使每个时刻的目标函数值达到最小化。因此二者在控制变量上具备等价性。

全局电压优化与滚动电压优化在关键方面高度一致且预测数据相同时本质等价、结果无差异, 但滚动电压优化更具优势, 因其运用可实时更新的超短期预测数据, 能贴近实际运行状况, 更精准捕捉系统动态变化、提升结果精确性, 可有效应对实际工况提升电压质量、保障电力系统稳定高效运行。

3.3 多周期滚动优化

在先前阐述的全局迭代优化以及滚动迭代优化策略中, 均未对模型存在时间耦合的情形予以考量。倘若配电网中存在诸如储能这类调节资源, 其荷电状态或其他相关因素具有时间耦合特性时, 便无法再以简易的方式将全局模型依照各个时刻拆解

为相互独立的小模型。因此本文基于滚动优化提出了多周期滚动优化方法, 其详细架构如图5所示。

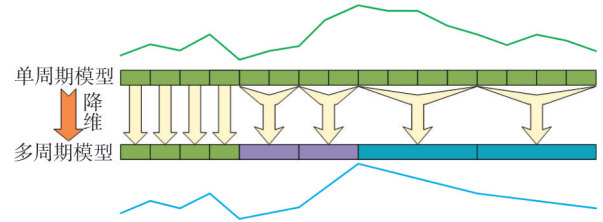


图5 多周期滚动优化模型

Fig. 5 Multi-cycle rolling optimization model

加入储能后对模型目标函数和约束条件进行修正。式(1)增加储能的调度成本为:

$$\begin{aligned} \min f_i(p, q, v) &= W_t(u_{1,t}, u_{2,t}, u_{3,t}) \\ &= \kappa_1 (C_t^{\text{import}} \cdot P_t^{\text{import}} - C_t^{\text{export}} \cdot P_t^{\text{export}}) + \\ &\quad \kappa_2 \left(\sum_{i=1}^n \lambda (P_{i,t}^{\text{pre}} - P_{i,t}^{\text{pv}}) \right) + \\ &\quad \kappa_3 \left(\sum_{i=1}^N |V_{i,t} - V_N| \right) + \kappa_4 \left(\sum_{i=1}^m c_{\text{deg}} P_{i,t}^{\text{es}} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

式中: κ_4 为权重系数; m 为储能数量; c_{deg} 为储能度电成本; $P_{i,t}^{\text{es}}$ 为 t 时刻第 i 个储能的充放电功率。

另外, 模型增加储能的运行约束如式(33)~(37)所示。

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq \sigma_{i,t} P_{i,t}^{\text{es}_{\text{max}}} \quad (33)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq (1 - \sigma_{i,t}) P_{i,t}^{\text{es}_{\text{max}}} \quad (34)$$

$$P_{i,t}^{\text{es}} = P_{i,t}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{dis}} \quad (35)$$

$$E_{i,t} = E_{i,t-1} + \eta^{\text{ch}} \cdot P_{i,t}^{\text{ch}} \cdot \Delta t - \frac{1}{\eta^{\text{dis}}} \cdot P_{i,t}^{\text{dis}} \cdot \Delta t \quad (36)$$

$$E_{\min} \leq E_{i,t} \leq E_{\max} \quad (37)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 为 t 时刻第 i 个储能的三相总充电功率; $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 为 t 时刻第 i 个储能的三相总放电功率; $\sigma_{i,t}$ 为0-1变量, 表示储能的充放电状态, 取值为1时表示充电, 取值为0时表示放电; $P_{i,t}^{\text{es}_{\text{max}}}$ 为储能充放电功率的上限; $E_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 个储能的容量; η^{ch} 为储能的充电效率; η^{dis} 为储能的放电效率; Δt 为时间间隔; $E_{\min}$ 为储能的容量下限; $E_{\max}$ 为储能的容量上限。

单周期 T_1 和多周期 T_2 模型的时间序列分别为:

$$T_1 = \{ \Delta t, 2\Delta t, \dots, N_{\text{predct}} \Delta t \} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} T_2 = \{ &\Delta t_s, 2\Delta t_s, \dots, N_{\text{predct},s} \Delta t_s, \\ &\Delta t_m, 2\Delta t_m, \dots, N_{\text{predct},m} \Delta t_m, \\ &\Delta t_1, 2\Delta t_1, \dots, N_{\text{predct},1} \Delta t_1 \} \end{aligned} \quad (39)$$

式中: Δt 为全局电压优化模型预测数据的时间间隔; N_{prdt} 为序列长度; Δt_s 为滚动电压优化模型短期预测数据的时间间隔, 序列长度为 $N_{\text{prdt},s}$; Δt_m 为滚动电压优化模型中短期预测数据的时间间隔, 序列长度为 $N_{\text{prdt},m}$; Δt_l 为滚动电压优化模型长期预测数据的时间间隔, 序列长度为 $N_{\text{prdt},l}$ 。

由式(39)可知, 在多周期滚动优化模型的构建策略中, 针对距离当前时间点较近的时刻, 采用短周期甚至超短周期的预测数据, 而对于那些距离当前相对较远的时刻, 则选用更长周期的预测数据。通过这种巧妙的时间维度数据配置方式, 成功地将原本的单周期模型转化为多周期滚动优化模型。这一转化过程带来了显著的优化效果, 极大地削减了模型的规模以及所需的计算量, 有效提升了模型的计算效率与运行性能。

从预测数据准确性的维度分析, 由于近期的预测数据受到时间跨度短、不确定性因素影响相对较少等有利因素的作用, 其准确率往往相对较高; 而远期预测数据则因时间跨度大、众多复杂因素的累积影响, 致使其准确率呈现出较低的水平。因此, 在较远时刻运用长周期预测数据替代短周期预测数据, 这种数据替换策略具有充分的合理性与必要性。

4 算例分析

4.1 场景建立

本文采用 IEEE 13 节点系统, 系统示意图如图 6 所示。该系统电压等级为 4.16 kV, 5 组分布式光伏分别接入节点 634、645、652、671、675, 容量都为 2 000 kW, 各节点的有功负荷预测数据如图 7, 光伏预测数据如图 8, 图中均为三相预测总功率。本文为了验证全局电压优化与滚动电压优化的等效性, 使用相同的负荷和光伏预测数据。通过计算, 24 h 光伏预测有功功率出力比负荷有功功率需求约等于 200%, 是极高比例新能源接入场景。本文配电系统与上游电网的购电和售电价格分别为 0.60 元/kWh 和 0.25 元/kWh; 弃光惩罚为 0.10 元/kWh; 光伏逆变器功率因数限制在 0.98; 电压幅值上下限标幺值分别为 1.05 p. u. 和 0.95 p. u.。

为了验证分布式光伏对配电网的主动支撑效果以及两种电压优化模型的等效性, 分别使用两个模型进行对比分析。

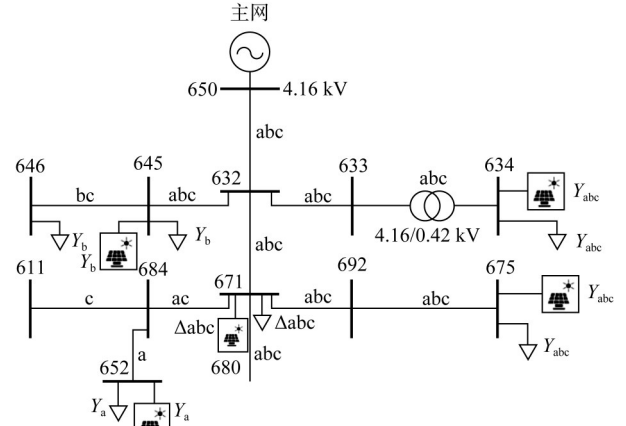


图 6 IEEE 13 节点系统拓扑连接图

Fig. 6 Diagram of IEEE 13-node system topology connection

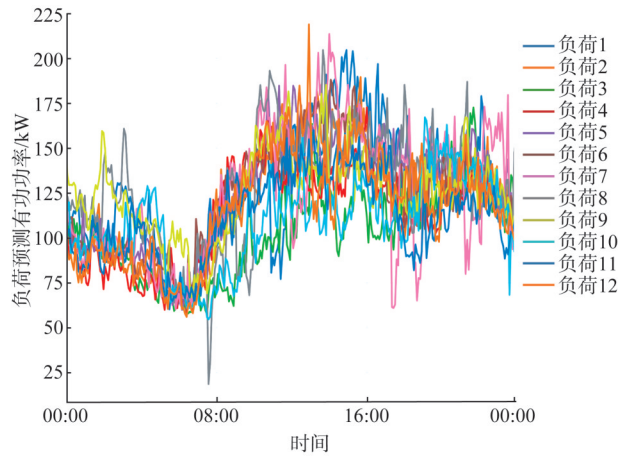


图 7 负荷有功功率预测曲线

Fig. 7 Load active power prediction curves

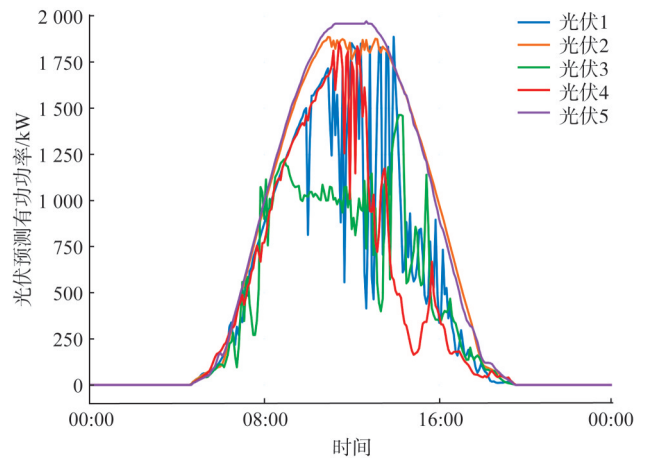


图 8 光伏有功功率预测曲线

Fig. 8 PV active power prediction curves

- 1) 模型 1: 采用本文提出的全局电压优化模型。
- 2) 模型 2: 采用本文提出的滚动电压优化模型。

在该场景基础上，分别给 5 个光伏配备相应的储能，并使用多周期滚动优化模型验证。

4.2 结果分析

对模型采用 Gurobi 求解器进行求解，模型求解时间和求解结果如表 2 所示。

表 2 模型求解结果			
Tab. 2 Solution results of models			
模型	求解时间/s	经济收益/元	电压合格率/%
全局电压优化模型	7.953 1	3 927.72	96.5
滚动电压优化模型	6.703 1	4 103.34	99.7

模型优化后的系统三相电压曲线如图 9 和图 10 所示。从结果中可以看出全局电压优化模型和滚动电压优化模型结果基本一致，但是滚动电压优化模型求解速度更快，无论是经济收益还是电压合格率均为更优，这是由于滚动优化模型对每个时刻的网络进行单独优化，使得优化结果更加精确。优化后的光伏三相总有功弃光功率结果如图 11 和图 12 所示。

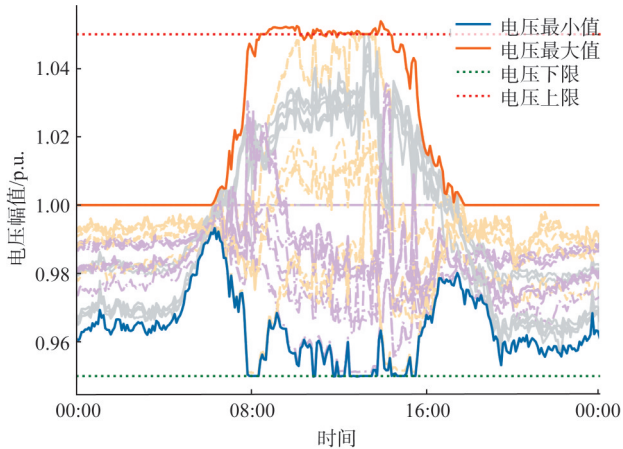


图 9 全局电压优化模型调控下三相电压曲线
Fig. 9 Three-phase voltage curves of global voltage optimization model

二者的弃光率分别为 5.9 % 和 6.9 %，弃光率均较为理想。虽然滚动电压优化模型弃光率相对更高，但这是为了保证电压电压不越限做出的必要调整，保证了电压合格率。

加入储能之后进行多周期滚动优化的系统电压曲线和储能荷电状态曲线如图 13 和图 14 所示。

从电压结果可以看出，加入储能之后更好实现了光伏消纳，电压最大值明显下降；从储能荷电状态可以看出，由于高比例分布式光伏场景中储能虽

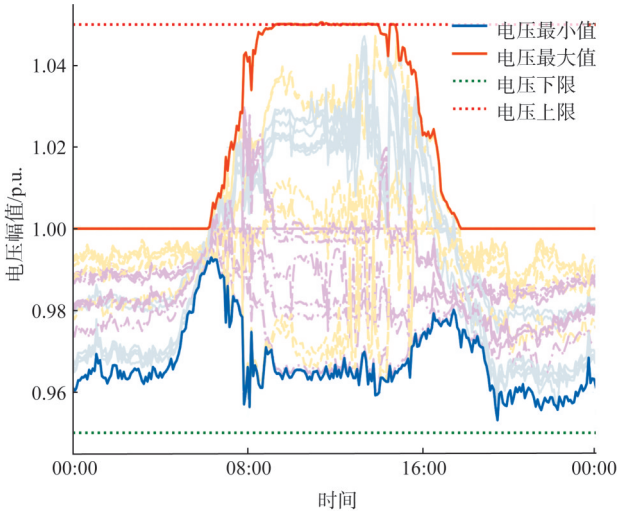


图 10 滚动电压优化模型调控下三相电压曲线
Fig. 10 Three-phase voltage curves of rolling voltage optimization model

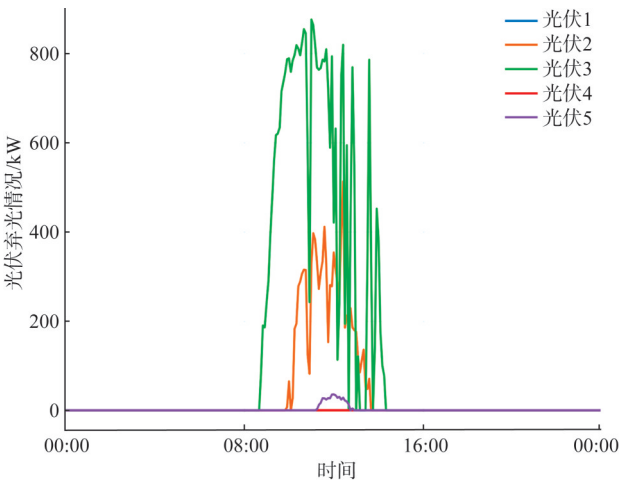


图 11 全局电压优化模型光伏弃光情况
Fig. 11 PV curtailment in the global voltage optimization model

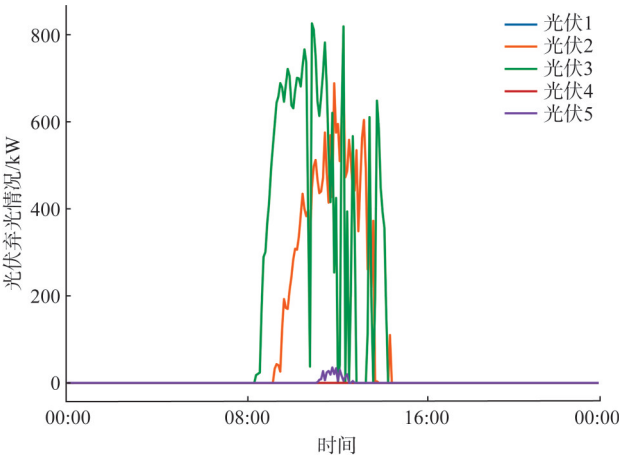


图 12 滚动电压优化模型光伏弃光情况
Fig. 12 PV curtailment in the rolling voltage optimization model

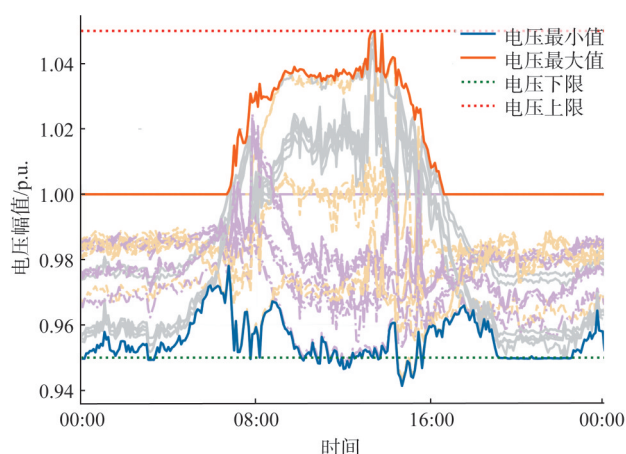


图 13 多周期电压优化模型调控下三相电压曲线

Fig. 13 Three-phase voltage curves of multi-cycle voltage optimization model

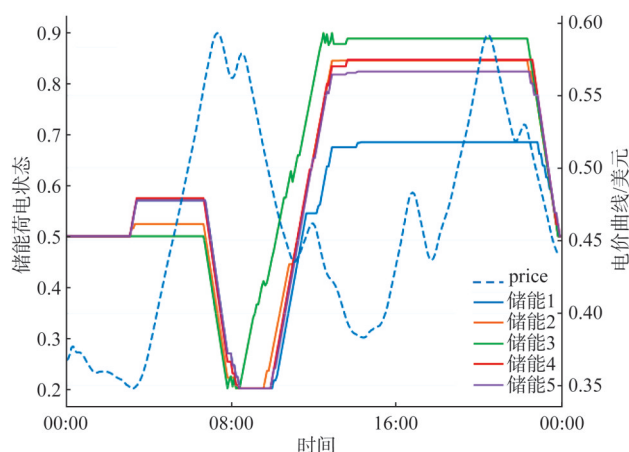


图 14 储能的荷电状态曲线

Fig. 14 Curves of state of charge of the energy storage

对电价偶有响应,但主体还是对光伏峰段进行了消纳。上述结果验证了多周期滚动电压优化模型的准确性。

5 结论

为了解决极高比例光伏接入配电网带来的电压越限问题,充分挖掘光伏本身的主动支撑能力,本文提出了光伏有功-无功功率协调优化电压方法,得出主要结论如下。

1)对比优化前高比例新能源配电网电压曲线,采用本文提出的电压优化方法将电压合格率从小于70%提升到滚动电压优化的99.9%,电压治理效果良好。

2)本文提出的滚动电压优化结果与全局电压优化结果趋于一致,但滚动优化求解速度提高

15.7%,且模型占用资源更小。

3)多周期滚动优化考虑储能类资源荷电状态的时间耦合特性,采用多周期预测数据削减模型规模,兼具全局优化与滚动优化的优点,在保证求解精度的前提下提高模型求解速度。

参考文献

- [1] 任相霖,张粒子,黄弦超.计及预测误差时变相关特性的新型电力系统爬坡容量需求分析方法[J].南方电网技术,2024,18(1):49-57.
REN Xianglin, ZHANG Lizi, HUANG Xianchao. Analysis method for ramp capacity demand of new power system considering time-variant correlation characteristics of forecast errors[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 49-57.
- [2] 刘俊磊,刘新苗,娄源媛,等.考虑源荷储不确定性的新型电力系统随机生产模拟方法[J].南方电网技术,2024,18(6):36-42.
LIU Junlei, LIU Xinmiao, LOU Yuanyuan, et al. Stochastic production simulation method for new power system considering uncertainty of source network load and storage[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 36-42.
- [3] 李建林,丁子洋,游洪灏,等.构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J].高压电器,2023,59(7):1-11.
LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.
- [4] LI Z. Prospects of photovoltaic technology[J]. Engineering, 2023(21): 28-31.
- [5] ZHAO Xingang, WANG Zhen. Technology, cost, economic performance of distributed photovoltaic industry in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019(110): 53-64.
- [6] JÄGER-WALDAU A. PV status report 2019[J]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019: 7-94.
- [7] 余昆,唐修明,陈星莺.高比例分布式光伏接入的配电网过电压责任分摊方法[J].中国电机工程学报,2023,43(24): 9535-9546.
YU Kun, TANG Xiuming, CHEN Xingying, et al. Allocation method of overvoltage responsibility in distribution network with high proportion distributed photovoltaic[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9535-9546.
- [8] LI Y, XIE K, WANG L. The impact of PHEVs charging and network topology optimization on bulk power system reliability[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 163(10): 85-97.
- [9] KHARRAZI A, SREERAM V, MISHRA Y. Assessment techniques of the impact of grid-tied rooftop photovoltaic generation on the power quality of low voltage distribution network-a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020(120): 109643.
- [10] 王秀茹,刘刚,黄华峰.考虑分布式电源的配电网无功调度和储能优化方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(4): 134-142,208.
WANG Xiuru, LIU Gang, HUANG Huafeng. Reactive power

- dispatching and energy storage optimization for distribution network with distributed power resources [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 134 – 142, 208.
- [11] 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.
- [12] TALKINGTON S, GRIJALVA S, RENO M J. Solar PV inverter reactive power disaggregation and control setting estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4773 – 4784.
- [13] LIU L, ZHAO Y, CHANG D. Prediction of short-term PV power output and uncertainty analysis [J]. Applied Energy, 2018(228): 700 – 711.
- [14] GUO Z, WEI W, CHEN L. Impact of energy storage on renewable energy utilization: a geometric description [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 874 – 885.
- [15] 边晓燕, 孙明琦, 赵健. 基于一致性算法的源-荷协同分布式优化调控策略 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1334 – 1347, 1540.
- BIAN Xiaoyan, SUN Mingqi, ZHAO Jian. Distributed coordinative optimal dispatch and control of source and load based on consensus algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1334 – 1347, 1540.
- [16] ALMEIDA D, PASUPULETI J, EKANAYAKE J. Comparison of reactive power control techniques for solar PV inverters to mitigate voltage rise in low-voltage grids [J]. Electronics, 2021, 10(13): 2079 – 9292.
- [17] 袁昌昊, 朱金大, 倪建富. 含分布式光伏的配电网双层协调电压优化方法 [J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 74 – 82.
- YUAN Changhao, ZHU Jinda, NI Jianfu. Coordinated voltage optimization method in distribution network with distributed photovoltaic [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 74 – 82.
- [18] 李培帅, 吴在军, 张错. 主动配电网分布式混合时间尺度无功/电压控制 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 160 – 168.
- LI Peishuai, WU Zaijun, ZHANG Cuo. Distributed hybrid-timescale voltage/var control in active distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 160 – 168.
- [19] 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.
- [20] 王景钢, 刘轶. 考虑光伏逆变器电流裕度的主动配电网动态电压支撑策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 105 – 113.
- WANG Jinggang, LIU Yi. Dynamic voltage support strategy for an active distribution network considering the current margin of a photovoltaic inverter [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 105 – 113.
- [21] 刘洪, 徐正阳, 葛少云. 考虑储能调节的主动配电网有功—无功协调运行与电压控制 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 51 – 58.
- LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun. Coordinated operation of active-reactive power and voltage control for active distribution network considering regulation of energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 51 – 58.
- [22] 张艳丽, 王争冕, 薛成. 考虑新能源接入的配电网两阶段有功无功协调降损方法 [J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 121 – 129.
- ZHANG Yanli, WANG Zhengmian, XUE Cheng. A two-stage active and reactive power coordinated loss reduction method for distribution networks integrated with new energy [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 121 – 129.
- [23] 蔡永翔, 杨安黔, 付宇. 面向分布式光伏并网和电能替代的低电压配电网自适应控制 [J]. 可再生能源, 2023, 41(10): 1343 – 1351.
- CAI Yongxiang, YANG Anqian, FU Yu. An adaptive control facing to distributed PV integration and electricity substitution in LV distribution networks [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(10): 1343 – 1351.
- [24] 康田园, 刘科研, 李昭. 基于光伏逆变器调节的中低压配电网电压分层协调控制策略 [J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1225 – 1234.
- KANG Tianyuan, LIU Keyan, LI Zhao. Hierarchical voltage coordination control strategy of middle-and low-voltage level power distribution network based on photovoltaic inverter adjustments [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1225 – 1234.
- [25] 古永亦, 魏煌. 基于模型预测控制的有源配电网电压协调控制 [J]. 微型电脑应用, 2025, 41(1): 115 – 119.
- GU Yongyi, WEI Huang. Voltage coordinated control of active distribution network based on model predictive control [J]. Microcomputer Applications, 2025, 41(1): 115 – 119.
- [26] BAZRAFASHAN M, GATSIS N. Comprehensive modeling of three-phase distribution systems via the bus admittance matrix [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2015 – 2029.
- [27] BERNSTEIN A, WANG C, DALL'ANESI E. Load flow in multiphase distribution networks: existence, uniqueness, non-singularity and linear models [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 5832 – 5843.
- [28] WANG L, DUBEY A, GEBREMEDHIN A H. 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.
- [29] SI Zhiyuan, YANG Ming. Photovoltaic power forecast based on satellite images considering effects of solar position [J]. Applied Energy, 2021, 302(15): 117514.1 – 117514.10.
- [30] SHI Jie, CHEN Yaobang, CHENG Xingong, et al. Four-stage space-time hybrid model for distributed photovoltaic power forecasting [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 59(1): 1129 – 1138.

收稿日期: 2024-12-10; 网络首发日期: 2025-09-01

作者简介:

何明君(1997), 女, 通信作者, 工程师, 硕士, 从事电力系统运行分析及电能质量分析治理工作, hmj.97@foxmail.com;

文贤旭(1972), 男, 高级工程师(教授级), 学士, 研究方向为储能及新能源, 13985410224@139.com;

周科(1984), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为智能配电, 178552792@qq.com。