

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.011

含分布式光伏的配电网模型预测控制优化方法

陈宇星¹, 梁芙蓉¹, 尤炜², 陈飞雄^{3,4}, 郭奕鑫^{3,4}, 邵振国^{3,4}

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003; 2. 国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000; 3. 福建省电器智能化工程技术研究中心, 福建 福州 350108; 4. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 分布式光伏的高渗透率和不确定性对节点电压和潮流分布产生了较大影响, 给配电网的安全运行带来了新的挑战, 如何对含分布式光伏的配电网进行有效准确的优化控制是亟须解决的问题。为此, 文中提出一种含分布式光伏的配电网模型预测控制优化方法, 以减小节点电压偏差和网络损耗为目标, 基于模型预测控制方法不断更新预测信息并构建优化模型, 对分布式光伏和储能设备进行滚动优化控制。采用修改的 IEEE 33 节点系统作为算例进行验证, 仿真结果表明配电网的节点电压偏差和网络损耗得到了有效降低, 优化效果相较于日前优化方法更贴近实际结果。基于模型预测控制, 所提方法有助于配电网在分布式光伏接入下安全运行, 且能减小控制方案与实际情况的偏差。

关键词: 配电网; 分布式光伏; 模型预测控制; 滚动优化; 电压偏差; 网络损耗

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)06-0100-10

0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统, 是贯彻落实能源安全新战略的重大需要, 也是实现“双碳”目标的重要途径^[1]。在众多新能源中, 分布式光伏因其高效灵活、建设简易等优点得到了快速发展, 在配电网中的渗透率逐步升高^[2-4]。

然而, 随着分布式光伏在配电网中的渗透率逐年升高, 其对配电网运行方式的影响日益严重, 使得配电网原有的网络结构以及潮流分布发生变化, 并可能在节点电压和网络损耗等方面产生一系列不可忽视的问题^[5-8]。例如, 大量分布式光伏的接入将改变配电网中的能量流动方向, 使得传统的单向潮流变为双向潮流, 进而改变全网的节点电压分布, 甚至会产生节点电压越限问题^[9]; 此外, 在辐射状配电网中, 当某一节点上的分布式光伏接入容量过大, 超出沿能量流动方向的其后节点负荷需求之和时, 将出现功率倒送现象, 可能导致配电网的网络损耗增大^[10]。为保证含高渗透率分布式光伏的配电网运行时的电压稳定并降低网络损耗, 有必要采取合理有效的优化方法^[11]。

文献[12]利用光伏逆变器的有功/无功调节能力, 对含分布式光伏的配电网电压进行优化。文献

[13]为解决高渗透率分布式光伏配电网中的节点电压越限问题, 以光伏有功功率削减量和网络损耗最小为目标, 对分布式光伏输出的有功和无功功率进行优化。文献[14]则以网损最小、电压波动最小和分布式光伏消纳最大为目标对配电网进行优化控制。然而, 上述研究均基于日前的源荷预测信息进行一次性离线优化控制, 忽略了在实际调度中配电网运行情况变化和分布式光伏出力波动等对日前优化调度效果的影响。模型预测控制(model predictive control, MPC)方法包含模型预测、滚动优化、反馈校正3个环节, 通过在日内进行多次滚动优化, 并在每次滚动优化中基于更新的预测信息和反馈的系统状态进行优化, 能够降低系统扰动对优化运行的影响, 给出更符合实际情况的优化调度方案, 具有良好的鲁棒控制性能^[15-17]。文献[18]为解决分布式电源出力波动导致的节点电压越限问题, 基于MPC框架对分布式电源的出力进行滚动优化与本地控制。文献[19]考虑源荷波动特性, 利用MPC方法分别在长、短时间尺度上对配电网的有功、无功功率进行滚动优化控制, 从而降低配电网的网络损耗。

尽管文献[18-19]基于MPC方法实现了配电网的优化控制, 保证了配电网运行的安全性与经济性, 但其仅考虑了节点电压越限或网络损耗问题, 难以实现配电网的综合优化。为此, 文中提出了一种含分布式光伏的配电网MPC优化方法, 对配电网中的分布式光伏和储能设备进行优化控制, 在实现

收稿日期: 2023-06-22; 修回日期: 2023-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107080); 福建省自然科学基金资助项目(2021J05135); 国家电网有限公司科技项目(52130021N002)

分布式光伏可靠消纳的同时,减小节点电压偏差与网络损耗,保证配电网的可靠、经济运行。

1 含分布式光伏的配电网优化模型

1.1 目标函数

为在降低含分布式光伏配电网的节点电压偏差和网络损耗的同时兼顾运行经济性,以最小化节点电压偏差惩罚成本、线路有功损耗与光伏有功削减惩罚成本之和为目标:

$$\min \sum_{t=1}^T \left(c_V \sum_{j \in \Omega_N} \Delta V_{j,t} + c_{\text{loss}} \sum_{i \in \Omega_{e,j}} I_{ij,t}^2 R_{ij} + c_{\text{PV}} \sum_{j \in \Omega_{\text{DC}}} P_{\text{dec},j,t} \right) \Delta t \quad (1)$$

式中: $\Delta V_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 的电压偏差; $I_{ij,t}$ 为 t 时段线路 ij 上流过的电流; R_{ij} 为线路 ij 的电阻; $P_{\text{dec},j,t}$ 为 t 时段节点 j 上的光伏有功削减量; c_V 为电压偏差惩罚系数; c_{loss} 为网损折算系数; c_{PV} 为分布式光伏有功削减成本系数; Δt 为优化间隔; T 为优化时段; Ω_N 为配电网节点集合; $\Omega_{e,j}$ 为以节点 j 为末端节点的始端节点集合; Ω_{DC} 为分布式光伏接入节点集合。

为体现节点电压与基准值之间的偏差,将节点电压偏差^[20]定义为:

$$\Delta V_{j,t} = |V_{j,t} - V_{\text{base},j}| \quad (2)$$

式中: $V_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 的电压标幺值; $V_{\text{base},j}$ 为节点 j 的电压基准值,设为 1 p.u.。

1.2 约束条件

1.2.1 潮流约束

文中以含分布式光伏的辐射状配电网为研究对象,鉴于 DistFlow 潮流模型无需电压相角和电流相角变量,与传统交流潮流模型相比更为简单^[21],因此采用 DistFlow 潮流模型,将配电网的潮流约束写为:

$$\begin{cases} \sum_{i \in \Omega_{e,j}} (P_{ij,t} - I_{ij,t}^2 R_{ij}) - \sum_{k \in \Omega_{s,j}} P_{jk,t} + P_{\text{in},j,t} = 0 \\ \sum_{i \in \Omega_{e,j}} (Q_{ij,t} - I_{ij,t}^2 X_{ij}) - \sum_{k \in \Omega_{s,j}} Q_{jk,t} + Q_{\text{in},j,t} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{j,t}^2 = V_{i,t}^2 - 2(P_{ij,t} R_{ij} + Q_{ij,t} X_{ij}) + I_{ij,t}^2 (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) \quad (4)$$

$$I_{ij,t}^2 V_{j,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \quad (5)$$

式中: $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时段由节点 i 流向节点 j 的有功和无功功率; X_{ij} 为线路 ij 的电抗; $P_{jk,t}$ 、 $Q_{jk,t}$ 分别为 t 时段由节点 j 流向节点 k 的有功和无功功率; $P_{\text{in},j,t}$ 、 $Q_{\text{in},j,t}$ 分别为 t 时段节点 j 的注入有功和无功功率; $\Omega_{s,j}$ 为以节点 j 为始端节点的末端节点集合; $V_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的电压。

在式(3)一式(5)中,电压和电流的平方项为非线性项,将增大模型求解难度,因此须引入辅助变量 $\tilde{V}_{j,t}$ 和 $\tilde{I}_{ij,t}$ 对其进行线性化,如式(6)所示。在此基础上可将式(5)松弛为如式(7)所示的二阶锥形式,进一步提高求解效率^[22]。文献[23]证明了当目标函数为增函数时,对辐射状配电网的二阶锥松弛是精确的。

$$\begin{cases} \tilde{V}_{j,t} = V_{j,t}^2 \\ \tilde{I}_{ij,t} = I_{ij,t}^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{V}_{j,t} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{V}_{j,t} \quad (7)$$

1.2.2 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{\text{in},j,t} = P_{G,j,t} + P_{\text{PV},j,t} + P_{c,j,t} - P_{d,j,t} - P_{L,j,t} \\ Q_{\text{in},j,t} = Q_{G,j,t} + Q_{\text{PV},j,t} - Q_{L,j,t} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{G,j,t}$ 、 $Q_{G,j,t}$ 分别为 t 时段主网注入的有功和无功功率; $P_{\text{PV},j,t}$ 、 $Q_{\text{PV},j,t}$ 分别为 t 时段节点 j 上的光伏有功和无功出力; $P_{c,j,t}$ 、 $P_{d,j,t}$ 分别为 t 时段节点 j 上的储能设备充、放电功率; $P_{L,j,t}$ 、 $Q_{L,j,t}$ 分别为 t 时段节点 j 上的有功和无功负荷需求。

1.2.3 安全运行约束

$$\begin{cases} V_{j,\min}^2 \leq \tilde{V}_{j,t} \leq V_{j,\max}^2 \\ I_{ij,\min}^2 \leq \tilde{I}_{ij,t} \leq I_{ij,\max}^2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{0,\min} \leq P_{0,t} \leq P_{0,\max} \\ Q_{0,\min} \leq Q_{0,t} \leq Q_{0,\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $V_{j,\min}$ 、 $V_{j,\max}$ 分别为节点 j 的电压下限值和上限值; $I_{ij,\min}$ 、 $I_{ij,\max}$ 分别为线路 ij 的电流下限值和上限值; $P_{0,t}$ 、 $Q_{0,t}$ 分别为 t 时段配电网与上级主网交互节点的有功和无功功率; $P_{0,\min}$ 、 $P_{0,\max}$ 分别为配电网和上级主网交互的有功功率下限值和上限值; $Q_{0,\min}$ 、 $Q_{0,\max}$ 分别为配电网和上级主网交互的无功功率下限值和上限值。

1.2.4 光伏调节约束

大量分布式光伏接入将导致配电网出现节点电压升高甚至越限的问题,而通过适当削减分布式光伏上网的有功功率,以及通过光伏逆变器的无功调节能力调节配电网中的无功功率,可以调整节点电压,实现电压支撑^[24]。具体调节原理如图1所示,其中半圆弧描述了光伏逆变器的装机容量,其值为 S_{PV} ; A 点对应的 P_{PVmax} 为光伏可上网的有功功率最大值,即为光伏的发电功率,在该点光伏逆变器的无功功率可调范围为 $[-Q_{\text{PVmax},1}, Q_{\text{PVmax},1}]$; 若将

有功功率削减到 B 点,其对应的 P_{dec} 为光伏的有功功率削减值,在该点光伏逆变器的无功功率可调范围扩大到 $[-Q_{PVmax,2}, Q_{PVmax,2}]$,具有更大的调节能力。为避免光伏逆变器功率因数过低影响配电网的正常运行,还需要约束光伏逆变器的最小功率因数,图 1 中, φ_{min} 为最小功率因数所对应的功率因数角。可以在 A 、 B 点之间通过削减光伏上网的有功功率,实现光伏逆变器无功功率可调范围的变化,为降低配电网的节点电压偏差与网损提供帮助。

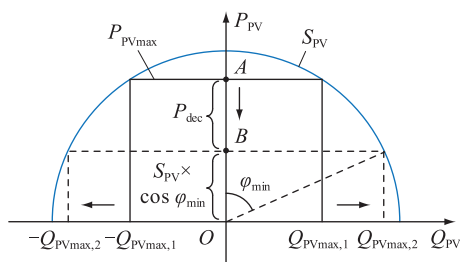


图 1 分布式光伏调节原理

Fig.1 Regulation principle of distributed photovoltaics

结合图 1 可得光伏调约束为:

$$P_{PV,j,t} = P_{PVmax,j,t} - P_{dec,j,t} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{dec,j,t} \leq P_{PVmax,j,t} - S_{PV,j} \cos \varphi_{min} \quad (12)$$

$$\begin{cases} Q_{PV,j,t}^2 \leq S_{PV,j}^2 - P_{PV,j,t}^2 \\ -P_{PV,j,t} \tan \varphi_{min} \leq Q_{PV,j,t} \leq P_{PV,j,t} \tan \varphi_{min} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{PVmax,j,t}$ 为 t 时段节点 j 上的光伏可上网有功功率最大值; $S_{PV,j}$ 为节点 j 上的光伏装机容量。

式(11)定义了光伏的实际上网功率与光伏发电功率、削减功率之间的关系;式(12)约束了光伏削减功率的上、下限值;式(13)则约束了光伏逆变器的无功功率调节范围。

1.2.5 储能设备约束

文中引入储能设备,以实现分布式光伏的充分利用,进一步提高优化控制效果。出于对储能设备的使用寿命和安全性的考虑,需要对储能设备的运用边界进行约束,具体约束如下:

$$S_{j,t} = S_{j,t-1} + \frac{\eta_{c,j} P_{c,j,t}}{E_j} \Delta t - \frac{P_{d,j,t}}{\eta_{d,j} E_j} \Delta t \quad (14)$$

$$\begin{cases} S_{j,min} \leq S_{j,t} \leq S_{j,max} \\ 0 \leq P_{c,j,t} \leq u_{j,t} P_{c,j,max} \\ 0 \leq P_{d,j,t} \leq (1 - u_{j,t}) P_{d,j,max} \end{cases} \quad (15)$$

$$S_{j,0} = S_{j,T} \quad (16)$$

式中: $S_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 上的储能设备荷电状态; $\eta_{c,j}$ 、 $\eta_{d,j}$ 分别为节点 j 上的储能设备充、放电效率; E_j 为节点 j 上的储能设备额定容量; $S_{j,min}$ 、 $S_{j,max}$ 分别为节点 j 上的储能设备荷电状态下限值和上限

值; $P_{c,j,max}$ 、 $P_{d,j,max}$ 分别为节点 j 上的储能设备充、放电功率上限值; $u_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 上的储能设备充、放电状态,为二进制变量, $u_{j,t} = 1$ 表示充电, $u_{j,t} = 0$ 表示放电; $S_{j,0}$ 、 $S_{j,T}$ 分别为优化调度周期前一时段和最后一时段的储能设备荷电状态。

2 配电网 MPC 优化方法

2.1 MPC 原理

MPC 是一种基于预测模型的闭环滚动优化控制方法,主要由模型预测、滚动优化和反馈校正 3 个环节组成。

模型预测环节通过预测模型对系统未来一段时间的状态进行预测,为后续的滚动优化和反馈校正环节提供先验知识。文中所提优化模型需要对光伏出力和负荷需求进行预测。考虑到目前已有大量相关预测方法的研究,文中不再对其预测模型进行研究,而是假设在已经获得源荷预测数据的基础上进行后续的优化控制。

滚动优化环节作为 MPC 的核心环节,其原理如图 2 所示。首先,将整个优化调度周期分为若干时段;然后,在第 k 个时段,获取当前时段起 N 个时段内的预测数据,并在线求解得到 N 个时段的最优控制策略,但仅将 N 个时段中第一个时段的控制策略下发执行;最后,向前滚动至第 $k+1$ 个时段,重新获取从该时段起的预测数据以及前一时段的系统状态信息,并重复进行上述的在线求解与下发执行等工作,直至完成整个周期的优化调度。通过在时间轴上不断向前滚动,以多次有限时段的在线优化代替一次离线的全时段优化。与全时段优化相比,滚动优化得到的是全局次优解,但其能够通过不断更新系统最新的预测信息,提高预测数据的可信度,降低不确定性对系统的影响^[25]。

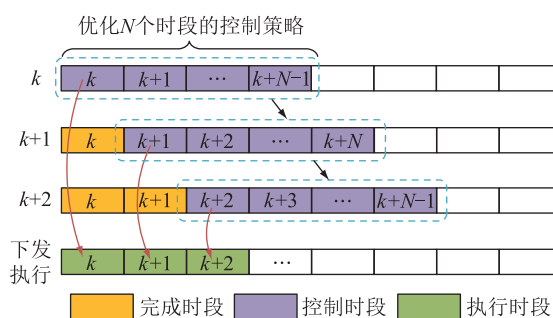


图 2 滚动优化原理

Fig.2 Principle of rolling optimization

因扰动等不确定因素的存在,实际系统的执行情况可能与下发的控制计划存在偏差,因此在每次滚动优化前,除了更新预测数据之外,还要采样系

统在前一时段的实时状态,起到反馈校正的作用,从而保证滚动优化具有更好的鲁棒性^[26]。

2.2 配电网 MPC 优化模型

文中主要基于 MPC 的滚动优化环节,对含分布式光伏的配电网进行优化控制。在每次滚动优化中,将分布式光伏发电功率与负荷需求的预测值作为模型预测环节所得到的输入变量,以前一时段内节点电压、线路电流和储能设备荷电状态的实际值作为反馈校正环节所采样的配电网实时状态,对滚动优化控制时域内配电网分布式光伏的调节量和储能设备的充、放电功率进行优化,并仅将第 1 个时段的优化方案下发执行。以 24 h 为一个优化调度周期,并将该优化调度周期等分为 96 个时段,每隔 15 min 进行一次日内滚动优化求解。结合第 1 章所提的优化模型,可以构建如式(17)所示的含分布式光伏的配电网 MPC 优化模型。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_t^{t+N-1} \left(c_V \sum_{j \in \Omega_N} \Delta V_{j,t} + c_{\text{loss}} \sum_{i \in \Omega_{e,j}} \tilde{I}_{ij,t} R_{ij} + \right. \\ \left. c_{\text{PV}} \sum_{j \in \Omega_{\text{DG}}} P_{\text{dec},j,t} \right) \Delta t \\ \text{s.t. 式(3)、式(4)、式(6)一式(16)} \end{array} \right. \quad (17)$$

由于辅助变量 $\tilde{V}_{j,t}$ 的引入,节点电压偏差式(2)须相应地改写为:

$$\Delta V_{j,t} = \left| \sqrt{\tilde{V}_{j,t}} - V_{\text{base},j} \right| \quad (18)$$

式(18)中存在开方项使得问题难以求解,基于配电网节点电压基本在额定电压 1 p.u.附近的实际工况,可得其平方项也在 1 附近,则可设 $\tilde{V}_{j,t} = 1 + \Delta \tilde{V}_{j,t}$ 。在此基础上,可在 1 附近对 $\tilde{V}_{j,t}$ 进行泰勒展开,由于 $|\Delta \tilde{V}_{j,t}| \ll 1$,泰勒展开中平方及以上的高阶项可忽略不计,故最终可将该开方项近似^[27]为:

$$\begin{aligned} \sqrt{\tilde{V}_{j,t}} &= \sqrt{1 + \Delta \tilde{V}_{j,t}} = 1 + \frac{1}{2} \Delta \tilde{V}_{j,t} - \\ &\frac{1}{8} \Delta \tilde{V}_{j,t}^2 + o(\Delta \tilde{V}_{j,t}^3) \approx \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tilde{V}_{j,t} \end{aligned} \quad (19)$$

此外,针对式(18)中的绝对值项,可引入 2 个辅助变量 $P_{1,t}$ 、 $P_{2,t}$,以及约束式(20)和式(21),对其进行如式(22)所示的线性化处理。

$$\begin{cases} P_{1,t} \geq 0 \\ P_{2,t} \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tilde{V}_{j,t} - V_{\text{base},j} = P_{1,t} - P_{2,t} \quad (21)$$

$$\Delta V_{j,t} = \left| \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tilde{V}_{j,t} - V_{\text{base},j} \right| = P_{1,t} + P_{2,t} \quad (22)$$

由于辅助变量 $P_{1,t}$ 、 $P_{2,t}$ 仅在目标函数中体现,

且模型优化趋势为使得目标函数最小,可保证 $P_{1,t}$ 、 $P_{2,t}$ 不同时为非零值,进而使得式(22)等价成立。

因此,含分布式光伏的配电网优化模型可以进一步表示为式(23)。该模型为混合整数线性规划模型,可利用商业求解器实现高效、精确的求解。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_t^{t+N-1} \left[c_V \sum_{j \in \Omega_N} (P_{1,t} + P_{2,t}) + c_{\text{loss}} \sum_{i \in \Omega_{e,j}} \tilde{I}_{ij,t} R_{ij} + \right. \\ \left. c_{\text{PV}} \sum_{j \in \Omega_{\text{DG}}} P_{\text{dec},j,t} \right] \Delta t \\ \text{s.t. 式(3)、式(4)、式(6)一式(16)、式(20)、} \\ \text{式(21)} \end{array} \right. \quad (23)$$

所提优化方法的具体流程如图 3 所示。

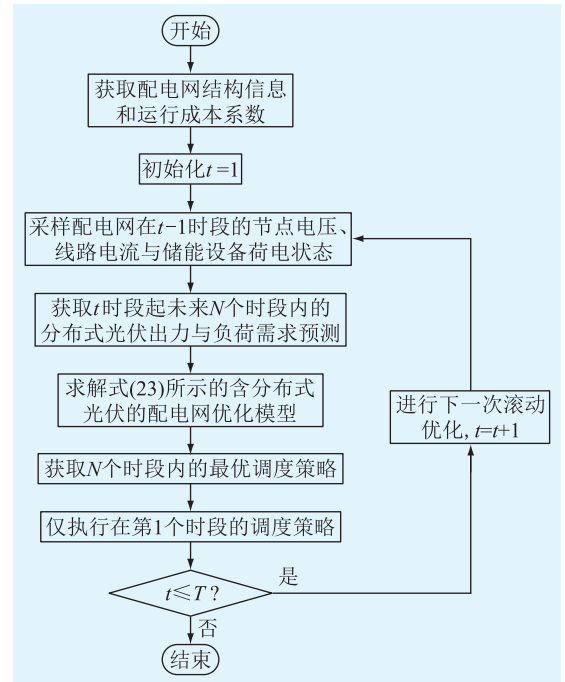


图 3 配电网 MPC 优化方法流程

Fig.3 Flow chart of MPC optimization method for the distribution network

3 算例分析

3.1 系统参数设置

以修改的 IEEE 33 节点系统为例进行分析验证,其拓扑见图 4。在 6、12、18 和 33 号节点接有分布式光伏 PV1、PV2、PV3、PV4,容量分别为 0.8、0.9、0.9、0.6 MV·A;在 12 和 18 号节点接有储能设备 Bat1、Bat2,容量均为 0.8 MW·h。取节点电压的安全运行范围为 0.95~1.05 p.u。设置线路的电流传输上限为 0.3 kA,电压偏差惩罚系数为 100 元/(p.u·h),网损折算成本系数为 400 元/(MW·h),分布式光伏有功削减成本系数为 700 元/(MW·h)^[28]。以 24 h

为一个优化周期,取优化间隔 Δt 为 15 min,控制时域 N 为 24 个时段,即 6 h,基于 MATLAB R2018b 平台和 YALMIP 工具包,调用 Gurobi 对所提优化模型进行求解。

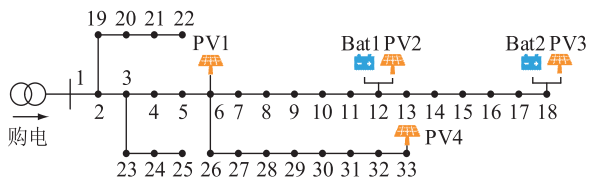


图 4 IEEE 33 节点系统拓扑

Fig.4 Topology of IEEE 33-node system

分布式光伏出力与负荷需求的日内预测、日前预测和实际曲线分别如图 5、图 6 所示。其中,日内预测数据的曲线更为贴近实际,因此其预测误差较小;而日前预测数据因预测时域较长,因此其曲线较为平滑,与实际曲线的偏差也较大。文中所提方法基于日内预测曲线进行优化控制。

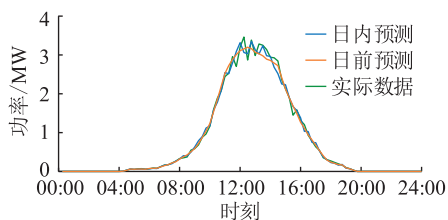


图 5 分布式光伏出力曲线

Fig.5 The curves of distributed photovoltaic output

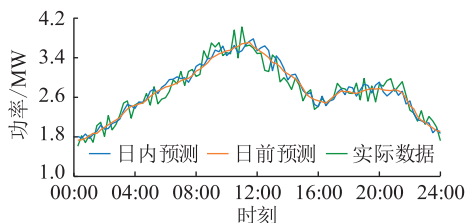


图 6 负荷需求曲线

Fig.6 The curves of load demand

为体现所提方法的有效性,将不对分布式光伏、储能设备进行优化控制的配电网运行结果作为对比(该结果可通过潮流计算得到),其节点电压分布情况如图 7 所示。由图 7 可知,优化前配电网中的 15~18 号节点在 12:00—15:00 存在电压越上限问题,而 14~18 号节点在 06:00—07:00 与 20:00—22:00 则存在电压越下限问题,且一天中 10~18 号节点的电压偏差程度较大。

3.2 储能设备与光伏出力调节分析

储能设备的荷电状态如图 8 所示。可以看出,2 个储能设备呈现大致相同的充、放电规律,均在 05:00—08:00 以及 18:00—22:00 放电,在 12:00—

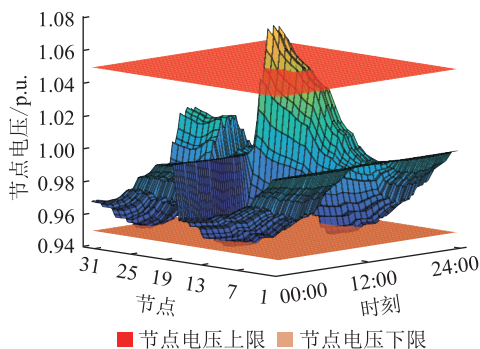


图 7 优化前配电网节点电压

Fig.7 Node voltage of the distribution network before optimization

15:00 充电。这是由于在 05:00—08:00,一方面配电网中负荷需求不断增大,另一方面系统预测到未来 12:00—15:00 分布式光伏出力将增加,为在充分、合理利用分布式光伏的同时提供足够的储能容量以缓解未来可能出现的电压升高问题,储能设备在该时段内进行放电。在 12:00—15:00,分布式光伏功率较大将改变能量流动方向,抬高接入点附近节点的电压与增加网损。为降低节点电压偏差和网损,并尽可能减少分布式光伏的削减量从而提高配电网的运行经济性,储能设备在该时段内充电以吸收多余的能量。在 18:00—22:00,分布式光伏功率逐步减少至 0,而负荷需求又逐步升高,为满足用户的用能需求,配电网通过储能设备放电,将在 12:00—15:00 储存的能量释放,实现分布式光伏能量在时域上的转移。此外,Bat2 的充、放电动作时刻相比于 Bat1 有所提前,这是由于 Bat2 位于 18 号节点,是配电网的末端节点,图 7 中该节点电压偏差程度大且存在电压越限,因此为了有效缓解该节点的电压越限问题,Bat2 需要更早地进行动作。

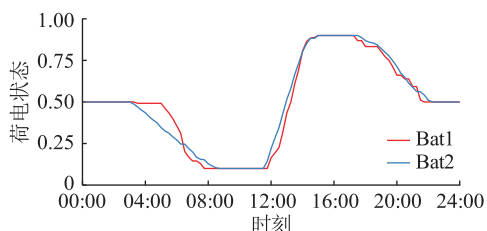


图 8 储能设备荷电状态

Fig.8 The state of charge of energy storage devices

分布式光伏逆变器的无功功率与有功功率削减情况分别如图 9 和图 10 所示。

从图 9 可以看出,PV1、PV4 上的光伏逆变器无功功率曲线和分布式光伏出力曲线类似且非负,表明 PV1、PV4 上的光伏逆变器并未参与吸收配电网中的无功功率;而 PV2、PV3 上的光伏逆变器分别在

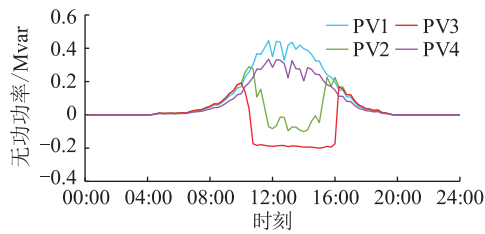


图9 分布式光伏逆变器无功功率

Fig.9 Reactive power of distributed photovoltaic inverters

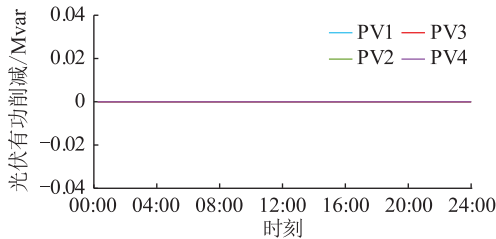


图10 分布式光伏有功削减

Fig.10 Active power reduction for distributed photovoltaics

12:00—15:00、11:00—16:00 时段无功功率为负值,表明其吸收了配电网中的无功功率。这是由于 PV1 位于 6 号节点,其能量传输路径多;PV4 则是由于光伏装机容量最小,因此在光伏大发时二者对节点电压的影响较小,无须利用光伏逆变器对无功功率进行调节。而 PV2、PV3 分别位于 12、18 号节点,其能量传输路径单一且光伏装机容量较大,在光伏大发时节点电压受分布式光伏并网的影响最大,因此 PV2、PV3 需要通过光伏逆变器吸收配电网中多余的无功功率,以缓解节点电压升高问题。此外, PV3 上的光伏逆变器吸收无功功率的开始时刻相比于 PV2 上的光伏逆变器更早、持续时间更长、吸收功率更多,表明 18 号节点电压受分布式光伏的影响高于 12 号节点,需要更加有力的无功功率调节措施。

从图 10 可以看出, PV1—PV4 均不存在有功功率削减。这是由于所提方法的优化目标考虑了光伏有功功率削减成本,能够在分布式光伏逆变器留有足够的无功功率调节范围的同时,促使分布式光伏全额上网,从而保证配电网的运行经济性。

3.3 优化前、后节点电压对比分析

由所提方法优化得到的配电网节点电压分布情况如图 11 所示。与图 7 对比可发现,所提方法能够有效解决配电网中的节点电压越限问题,此外一天中 10~18 号节点的电压偏差也得到了缩减。

为体现对配电网节点电压偏差的整体优化效果,对比优化前、后一天内各时刻配电网所有节点

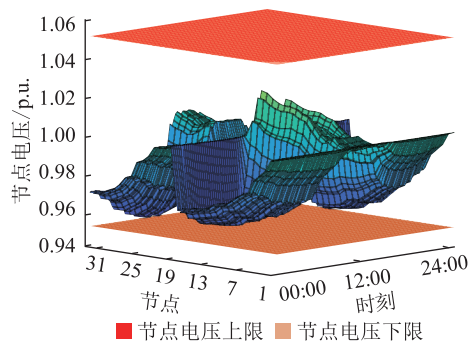


图11 优化后配电网节点电压

Fig.11 Node voltage of distribution network after optimization

的电压偏差之和,如图 12 所示。可以看出,优化后的节点电压偏差之和在一个周期内均小于优化前,尤其是在 03:00—09:00、11:00—16:00 和 18:00—22:00 时段内,节点电压偏差得到了有效降低。在 11:00—16:00,通过控制分布式光伏逆变器吸收配电网中多余的无功功率,并采用储能设备消纳分布式光伏盈余的有功功率,有效缓解了节点电压升高问题。在 03:00—09:00 和 18:00—22:00 时段内,配电网负荷需求较大,而分布式光伏出力较小甚至为 0,因此光伏调节作用微弱,仅依靠储能设备放能以减小节点电压偏差,故这 2 个时段的节点电压偏差减小程度弱于 11:00—16:00 这一时段。可以看出,所提方法能够在多个时段内有效合理地优化配电网的电压分布。

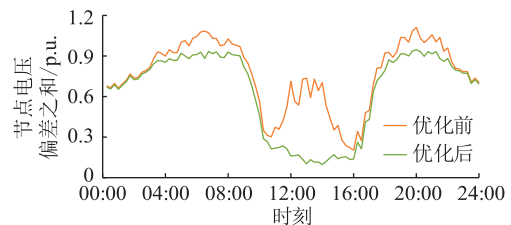


图12 节点电压偏差之和优化前、后对比

Fig.12 Comparison of the sum of node voltage deviations before and after optimization

为更好地体现所提方法在电压控制方面的有效性,取电压变化程度最大的 18 号节点进行剖面分析,其电压优化前、后对比如图 13 所示。从图 13 可以看出,在优化前,18 号节点在 12:00 存在电压越上限问题,而在 20:00 又存在电压越下限问题。在优化后,该节点的电压虽在 12:00 附近仍存在电压升高的情况,但通过 Bat2 进行储能消纳多余能量以及 PV2、PV3 吸收配电网中多余的无功功率,其电压已低于电压上限;而在 20:00,节点电压虽仍会降低,但通过 Bat2 放能,其电压已高于电压下限。可以看出,所提方法也能有效解决配电网运行中的电

压越限问题。

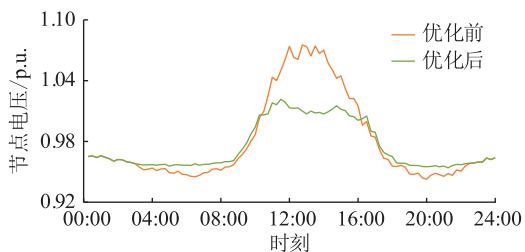


图 13 18 号节点电压优化前、后对比

Fig.13 Comparison of No.18 node voltage before and after optimization

3.4 优化前、后网损对比分析

优化前、后一个周期内各时刻配电网的网损如图 14 所示。可以看出,优化后的网损在一个周期内均小于优化前,尤其是在 03:00—09:00、12:00—15:00 和 18:00—22:00 这 3 个时间段内,网损得到了有效降低。其原因在于,在 12:00—15:00,配电网通过储能设备储能实现了分布式光伏的就地消纳,减少了大量能量在配电网中流动,从而减小这一时段的网损。而在 03:00—09:00 和 18:00—22:00 时段内,配电网依靠储能设备放能,改变了在分布式光伏不出力时配电网仅能从主网获取能量的情况,通过主网和储能设备的就近供能,缩短了能量传输距离,减小了配电网运行网损。

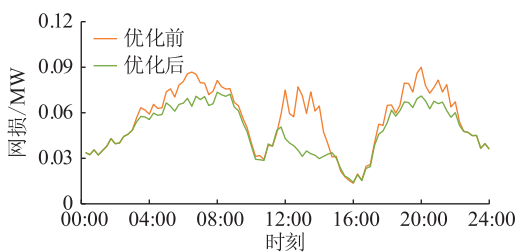


图 14 网损优化前、后对比

Fig.14 Comparison of power loss before and after optimization

3.5 不同控制时域的对比分析

为说明所选取的控制时域的有效性与合理性,选择 7 种不同控制时域进行对比分析。不同控制时域下配电网运行成本以及最长求解时间的变化趋势如图 15 所示。可以看出,当控制时域小于 6 h 时,配电网运行成本随着控制时域的增长而降低。这是由于当控制时域过短时,MPC 方法难以预见未来的分布式光伏出力与负荷需求变化情况,无法制定出更加适用于未来的调度计划,所得到的结果为局部最优解,即存在短视问题。而随着控制时域的逐渐增长,短视问题逐步得到缓解。当控制时域大于等于 6 h 时,配电网运行成本稳定在 1 966 元附近,表明此时优化结果已接近全局最优解。

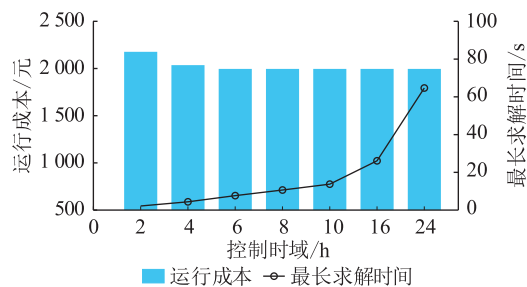


图 15 不同控制时域下配电网运行结果对比

Fig.15 Comparison of distribution network operation results in different control horizons

此外,随着控制时域的增长,每次优化求解的计算时间也随之增加。这是由于控制时域越长,所包含的预测数据等信息越丰富,优化问题愈加复杂,求解时间也相应增加。但需要指出的是,在任一控制时域下的最长求解时间均远小于优化间隔 Δt ,说明对潮流模型的二阶锥松弛和对目标函数的线性化处理使得所提方法具有良好的求解效率,能够满足在线应用的需求。

由图 15 可知,当控制时域为 6 h 时,所提方法能够获得经济性和求解性能兼具的调度结果。因此,考虑到实际工程需要,选择控制时域为 6 h。

3.6 不同方法的优化结果对比分析

为体现所提配电网 MPC 方法的优势所在,将所提方法的优化结果与其他方法进行对比分析。3 种方法的具体设置如下。

方法一:基于日内预测数据的配电网 MPC 方法。

方法二:基于日前预测数据的配电网日前优化控制方法。

方法三:基于实际数据的配电网日前优化控制方法。

方法一为文中所提方法,可利用不断更新的日内预测信息,具有预测误差更小的特点^[17]。在方法二中,日前优化方法仅利用日前预测信息,具有预测误差较大的不足。方法三为理想的实际情况,即假设在光伏出力和负荷需求不存在预测误差的前提下对配电网进行日前优化控制,其表征在实际情况下的最优控制结果,并将该结果作为方法一、二的参考对照。

3 种方法的优化结果如表 1 所示。可以看出,3 种方法的光伏削减惩罚成本均为 0,说明 3 种优化方法均能促使分布式光伏全额上网,有效提高了分布式光伏的利用率。此外,相比于方法二,方法一的节点电压偏差惩罚成本和网损折算成本都更接近理想的实际结果(即方法三所得结果)。这是因

为相比于方法二基于精度较低的日前预测数据,方法一能够利用更加接近实际的预测数据进行优化控制。且方法二虽能获得最具经济性的优化结果,但其忽视了日前预测数据与实际数据之间的偏差,在实际工程运用中,需要付出更高的实时调整代价以消除该偏差。而方法一虽然在优化结果的经济性上不如方法二,但其只需要更少的实时调整,有利于配电网整体运行的稳定性与经济性。

表 1 不同方法的优化结果对比
Table 1 Comparison of optimization results of different methods 元

方法	光伏削减 惩罚成本	电压偏差 惩罚成本	网损折算 成本
方法一	0	1 531.44	464.88
方法二	0	1 522.06	457.87
方法三	0	1 547.12	476.00

3.7 不同场景的优化结果对比分析

为进一步验证所提方法的有效性,设置 4 种不同数量的分布式光伏在不同节点接入的场景,并对比分析在各场景下优化前、后的结果。在不同场景下配电网优化前、后的节点电压偏差惩罚成本和网损折算成本如表 2 所示。可以看出,在场景 1—场景 4 中,配电网中的分布式光伏数量与接入位置皆有所不同,但通过所提方法进行优化控制后,节点电压偏差惩罚成本和网损折算成本均明显低于优化前,说明所提方法能够在多种配电网场景下有效降低节点电压偏差和网络损耗,保证配电网的可靠、经济运行。

表 2 不同场景的优化结果对比
Table 2 Comparison of optimization results in different scenarios 元

场景	光伏接入 位置	优化前		优化后	
		电压偏差 惩罚成本	网损折算 成本	电压偏差 惩罚成本	网损折算 成本
场景 1	12、18	1 933.05	613.06	1 774.64	563.63
场景 2	6、12、 18、33	1 838.97	536.16	1 531.44	464.88
场景 3	6、12、18、 22、25、33	1 791.21	501.65	1 589.90	444.44
场景 4	6、9、12、 18、22、25、 29、33	1 775.06	487.49	1 549.76	427.44

4 结论

文中针对含分布式光伏的配电网中节点电压偏差和网络损耗较高,以及日前优化方法与实际偏差较大的问题,提出含分布式光伏的配电网 MPC 优

化方法。主要结论如下:

(1) 基于分布式光伏的功率调节机理和储能设备的能量时移特性,对分布式光伏和储能设备进行优化控制,能够有效降低节点电压偏差和网络损耗。

(2) MPC 方法能够利用精度更高的预测数据,减小优化结果与实际情况的偏差,保证配电网的稳定、经济运行。

(3) 通过对潮流模型进行二阶锥松弛以及对目标函数中的非线性项进行线性化处理,能够降低优化模型的求解难度,满足配电网在线调度的应用需求。

文中所提方法须基于配电网的全局信息进行集中优化,但随着海量分布式光伏的分散接入,集中式优化方法将面临计算量大、通信延时等问题,因此分布式优化控制方法将是后续研究的重点。

参考文献:

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 李晓明,刘翔宇,李安昌,等. 配电网电压控制的分布式光伏无功仿射可调鲁棒优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(12):124-131.
LI Xiaoming, LIU Xiangyu, LI Anchang, et al. Distributed photovoltaic reactive power affine adjustable robust optimization method for voltage control of a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 124-131.
- [3] 陈志华,柯强,胡经纬,等. 含分布式光伏的有源配电网无功电压控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(2):16-24.
CHEN Zhihua, KE Qiang, HU Jingwei, et al. Research on reactive voltage control strategy of active distribution network containing distributed PV[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(2): 16-24.
- [4] 袁金斗,陈宋宋,李德智,等. 多种因素影响下分布式光伏典型特征演变规律研究[J]. 供用电, 2021, 38(3):72-77.
YUAN Jindou, CHEN Songsong, LI Dezhi, et al. Study on the evolution law of typical characteristics of distributed photovoltaic under the influence of various factors[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(3): 72-77.
- [5] 彭生江,陆军,张中丹,等. 光伏接入对电网的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 157-164.
PENG Shengjiang, LU Jun, ZHANG Zhongdan, et al. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 157-164.
- [6] 许鸣吉,沈磊,李胜,等. 计及综合因素的光伏接入配电网优选研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2):46-52.
XU Mingji, SHEN Lei, LI Sheng, et al. Optimization of photovol-

- taic access distribution network considering comprehensive factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 46-52.
- [7] 蒋子维, 吴峰. 主动配电网低压分布式光伏连锁故障分析[J]. 供用电, 2021, 38(4): 77-84.
JIANG Ziwei, WU Feng. Analysis of low voltage distributed photovoltaic cascading failure in active distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(4): 77-84.
- [8] CHEN J A, LI J Q, ZHANG Y C, et al. A hierarchical optimal operation strategy of hybrid energy storage system in distribution networks with high photovoltaic penetration[J]. Energies, 2018, 11(2): 389.
- [9] 虞宋楠, 刘念, 赵波. 面向光伏用户群的多主体分级电压调控方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 20-41.
YU Songnan, LIU Nian, ZHAO Bo. Multi-agent classified voltage regulation method for photovoltaic user group[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 20-41.
- [10] 曾强, 谢善益, 周刚, 等. 倒送功率约束下的分布式电源最大接入容量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 16-22.
ZENG Qiang, XIE Shanyi, ZHOU Gang, et al. Maximum capacity analysis for distributed generation considering reverse power constraint[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 16-22.
- [11] 时珉, 尹瑞, 姜卫同, 等. 分布式光伏灵活并网集群调控技术综述[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 1-9.
SHI Min, YIN Rui, JIANG Weitong, et al. Overview of flexible grid-connected cluster control technology for distributed photovoltaic[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 1-9.
- [12] 高鹏程, 王蕾, 李立生, 等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 190-196.
GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 190-196.
- [13] CHAI Y Y, GUO L, WANG C S, et al. Network partition and voltage coordination control for distribution networks with high penetration of distributed PV units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3396-3407.
- [14] 汪泽州, 张明明, 钱峰强, 等. 含光伏接入的中压配电网集中调控优化策略[J]. 中国电力, 2023, 56(2): 15-22.
WANG Zezhou, ZHANG Mingming, QIAN Fengqiang, et al. Centralized regulation and optimization strategy for MV distribution network with PV integration[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 15-22.
- [15] ZHENG Y, LI S Y, TAN R M. Distributed model predictive control for on-connected microgrid power management[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(3): 1028-1039.
- [16] 吴成辉, 林声宏, 夏成军, 等. 基于模型预测控制的微电网群分布式优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 530-538.
WU Chenghui, LIN Shenghong, XIA Chengjun, et al. Distributed optimal dispatch of microgrid cluster based on model predictive control[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 530-538.
- [17] YASSAMI H, RABIEE A, JALILVAND A, et al. Model predictive control scheme for coordinated voltage control of power systems at the presence of volatile wind power generation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(8): 1922-1928.
- [18] LI P, JI J, JI H R, et al. MPC-based local voltage control strategy of DGs in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2911-2921.
- [19] 张颖, 季宇, 唐云峰. 基于 MPC 含分布式光伏配电网有功功率—无功功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 140-146.
ZHANG Ying, JI Yu, TANG Yunfeng. Coordinated control of active and reactive power for distribution network with distributed photovoltaic based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 140-146.
- [20] 滕德云, 滕欢, 刘鑫, 等. 考虑多个分布式电源接入配电网的多目标无功优化调度[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 39-44.
TENG Deyun, TENG Huan, LIU Xin, et al. Multi-objective reactive power optimization of the distribution network considering a large number of DGs access[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 39-44.
- [21] BARAN M, WU F F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 735-743.
- [22] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 考虑网络约束和源荷不确定性的区域综合能源系统两阶段鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3090-3100.
GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Two-stage robust optimal scheduling of regional integrated energy system considering network constraints and uncertainties in source and load[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3090-3100.
- [23] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [24] 颜湘武, 徐韵, 李若瑾, 等. 基于模型预测控制含可再生分布式电源参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2022-2037.
YAN Xiangwu, XU Yun, LI Ruojin, et al. Multi-time scale reactive power optimization of distribution grid based on model predictive control and including RDG regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2022-2037.

- [25] 叶林,路朋,赵永宁,等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18): 6181-6198.
YE Lin, LU Peng, ZHAO Yongning, et al. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6181-6198.
- [26] 张风晓,靳小龙,穆云飞,等. 融合虚拟储能系统的楼宇微网模型预测调控方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4420-4428,4642.
ZHANG Fengxiao, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. Model predictive scheduling method for a building microgrid considering virtual storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4420-4428, 4642.
- [27] 高红均,刘俊勇,沈晓东,等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报,2017,37(6):1634-1645.
GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.
- [28] 柴园园,刘一欣,王成山,等. 含不完全量测的分布式光伏发电集群电压协调控制[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2202-2212,3.
CHAI Yuanyuan, LIU Yixin, WANG Chengshan, et al. Coordinated voltage control for distributed PVs clusters with incomplete measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2202-2212, 3.

作者简介:



陈宇星

陈宇星(1975),男,学士,高级工程师,从事新型电力系统调控运行技术相关工作(E-mail: cystar@vip.sina.com);

梁芙蓉(1973),女,学士,高级工程师,从事配电网精益调度和新型有源配电网调度管理工作;

尤炜(1983),男,硕士,高级工程师,从事配电网调度技术支撑系统运行技术研究与专业管理工作。

Model predictive control optimization method for distribution network containing distributed photovoltaics

CHEN Yuxing¹, LIANG Furong¹, YOU Wei², CHEN Feixiong^{3,4}, GUO Yixin^{3,4}, SHAO Zhenguo^{3,4}

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China;

2. State Grid Quanzhou Power Supply Company of Fujian Electric Power Co., Ltd., Quanzhou 362000, China;

3. Fujian Smart Electrical Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350108, China;

4. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The high permeability and uncertainty of distributed photovoltaics have a great impact on the node voltage and power flow distribution and pose a new challenge to the safe operation of distribution network. How to effectively and accurately optimize and control distribution network containing distributed photovoltaics is an urgent problem to be solved. A model predictive control optimization method for distribution network containing distributed photovoltaics is proposed. In order to reduce the voltage deviation of nodes and power loss, the prediction information is continuously updated and the optimization model is constructed based on the model predictive control, and the rolling optimization control of distributed photovoltaics and energy storage devices is carried out. A modified IEEE 33-node system is used as an example to verify that the voltage deviation of nodes and power loss of distribution network are effectively reduced. The proposed method has the better optimization effect than the day-ahead optimization method does for fitting the actual results. Based on the model predictive control, the proposed method is helpful to the safe operation of distribution network under the distributed photovoltaics access, thus reducing the deviation between the control dispatch and the actual situation.

Keywords: distribution network; distributed photovoltaics; model predictive control; rolling optimization; voltage deviation; power loss

(编辑 陆海霞)