

引用格式:袁天梦,杨一宁,胡泽春.考虑分布式光伏和储能接入的中低压配电网多时间尺度优化调度策略[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):101-112.

Citation: YUAN Tianmeng, YANG Yining, HU Zechun. Multi-time scale optimal dispatch strategy for medium-voltage and low-voltage distribution networks with distributed PV and BESS access[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 101-112.

# 考虑分布式光伏和储能接入的中低压 配电网多时间尺度优化调度策略

袁天梦<sup>1</sup>, 杨一宁<sup>2</sup>, 胡泽春<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063099; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:**近年来,中低压配电网中的光伏装机容量迅速增长,带来了功率流向变化和电压越限等问题。针对含高比例光伏的中低压配电网,提出一种日前-日内两阶段的多时间尺度优化调度方法。首先,以网损、光伏弃用惩罚成本以及储能系统充放电成本最小为目标函数建立集中式的中低压配电网日前随机优化模型,并转化为混合整数二阶锥规划(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)模型进行求解。其次,由于不同设备调节时间尺度不同以及低压配电网的准确网络参数难以获取,在日内阶段构建了中低压配电网双层滚动优化方法:上层集中式优化模型提供中压配电网运行的基准策略,下层分布式控制模型根据电压越限情况顺序调节低压层光伏逆变器无功、储能无功、储能有功以及光伏有功的出力。最后,基于改进的IEEE 33节点中压系统和21节点低压系统验证所提方法的有效性。

**关键词:**中低压配电网;分布式光伏;储能;集中式优化;分布式控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.011 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2025)01-0101-12

## Multi-time scale optimal dispatch strategy for medium-voltage and low-voltage distribution networks with distributed PV and BESS access

YUAN Tianmeng<sup>1</sup>, YANG Yining<sup>2</sup>, HU Zechun<sup>2</sup>

(1. Tangshan Power Supply Company of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Tangshan 063099, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In recent years, the installed capacity of photovoltaic (PV) in medium-voltage distribution networks (MDNs) and low-voltage distribution networks (LDNs) has increased rapidly, which brings about problems such as power flow direction change and overvoltage. For MDNs and LDNs with a high proportion of PV, a multi-time scale optimal dispatch method involving two stages is proposed: the day-ahead stage and the intra-day stage. Firstly, a centralized day-ahead stochastic optimization model of MDNs and LDNs is established with the objective of minimizing the network loss, the penalty cost of PV abandonment, and the charging and discharging cost of the battery energy storage system (BESS). Then, the model is transformed into a mixed-integer second-order cone programming (MISOCP) problem and solved. Secondly, in view of the different adjustment time scales of different facilities and the difficult acquisition of accurate network parameters of LDNs, a two-layer rolling optimization method for MDNs and LDNs is constructed at the intra-day stage. The upper centralized optimization model provides the benchmark strategy for the operation of MDNs, and the lower distributed control model sequentially adjusts the output of reactive power of PV inverters, reactive power and active power of BESS, and active power of PV in LDNs according to overvoltage degrees. Finally, based on the modified IEEE 33-bus MDN and 21-bus LDN, the effectiveness of the proposed method is verified.

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2024-03-19

基金项目: 国网冀北电力有限公司科技项目(520103220004)

通信作者: 杨一宁(2001—), 男, 博士研究生, 主要从事电网优化调度研究; E-mail: yyn23@mails.tsinghua.edu.cn

**Key words:** medium-voltage distribution network and low-voltage distribution network; distributed photovoltaic; battery energy storage system; centralized optimization; distributed control

近年来,以分布式光伏为代表的分布式电源(distribution generation, DG)大量接入配电网,导致中低压配电网的功率流向变化和电压波动范围显著增大。一些分布式光伏渗透率高的配电网出现了严重的电压越限问题。传统配电网调压的主要手段是调节有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)的分接头位置和控制补偿电容器组(capacitor bank, CB)的投切组数,但传统调压设备的调节速率较慢,并且不适合进行频繁调节<sup>[1-3]</sup>。光伏逆变器具有一定的无功支撑能力,优点在于响应速度快,并可以连续调节。此外,配电网若配置了电化学储能系统,其四象限运行特性可提供灵活的调节能力。

目前,已有较多文献对含高比例分布式光伏配电网的优化调度问题开展了研究,调度方法主要包括集中式优化<sup>[4-6]</sup>、就地式控制<sup>[7-8]</sup>和分布式控制<sup>[9-13]</sup>等。集中式优化方法从全局角度出发,对所有可控设备的运行点进行决策。文献[4]提出了一种考虑光伏出力不确定性的两阶段鲁棒优化调度模型。文献[5]以网损最小化为目标函数,提出一种在不平衡配电网中实现储能功率最优控制的非迭代优化模型。文献[6]基于最坏电压场景,集中协调OLTC、CB等传统调压设备,并提出一种快速决策算法进行求解。集中式优化需要满足量测完备、通信设施健全、网络参数已知等条件<sup>[14]</sup>,而低压配电网一般不具备全局通信的能力,并且网络参数难以准确获取。就地式控制无须与其他节点进行通信,只须检测自身节点的电压越限情况,按照预先设置好的下垂系数或灵敏度即可作出相应的控制决策。文献[7]提出了一种逆变器无功与储能有功相协调的本地控制策略,可有效调节电压并优化网损。文献[8]根据消耗的有功和无功分量以及光伏有功的本地瞬时测量值来实施光伏逆变器的就地电压-无功控制。就地式控制的缺点是难以协调多个分布式资源的运行方案。分布式控制一般仅需要部分节点间具有局部通信条件,不仅具备就地式控制的优点,而且可以充分发挥多个分布式资源的调节潜力。文献[9]提出一种结合局部下垂控制和分布式控制方法的电池储能系统(battery energy storage system, BESS)调度方案,并提出2种一致性算法进行求解。文献[10]提出一种分布式储能设备与传

统调压设备协调的配电网电压控制方法,但没有考虑光伏逆变器的调节能力。文献[11]研究了用于配电网分布式控制的通信基础设施设计方法,并开发了灵活的仿真环境用于评估不同通信技术和协议共存场景下的效果。文献[12]采用一致性算法协调储能和光伏逆变器的有功和无功,但没有考虑经济调度问题。

目前,针对中低压配电网协调运行的研究较少。文献[15]提出一种基于最优潮流的多电压等级配电网集中式电压控制方案,并考虑中压配电网为输电网提供电压支撑的辅助服务。文献[16]针对低压配电网通信设施安装不完备的情况提出一种“中压集中式-低压分布式”的分层协调调度策略,但没有考虑光伏逆变器和传统调压设备。文献[17]提出一种中低压配电网BESS和DG的最优位置和运行决策模型,并分解为规划和运行两阶段进行求解。文献[18]提出了一种含高比例DG的中低压配电网协调电压控制算法,但没有考虑不同调节设备的动作特点差异。除了在量测和通信方面较为薄弱外,低压配电网的线路阻抗、网络拓扑等参数难以准确获取,这增加了制定调度计划的难度。

本文计及光伏出力预测误差以及不同调节设备的动作特点与约束,提出一种考虑分布式光伏和储能接入的中低压配电网多时间尺度优化调度模型。首先,在日前优化阶段,基于光伏出力预测数据生成典型场景集,以网损、光伏弃用惩罚和储能充放电成本最小为目标函数建立中低压配电网的日前集中优化模型,并将其转换为混合整数二阶锥规划模型(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)进行求解。其次,在日内优化阶段,提出上层中压配电网集中式滚动优化和下层低压配电网电压控制协调的双层模型。最后,基于改进的IEEE 33节点中压系统和21节点低压系统验证了所提方法的有效性。

## 1 日前-日内两阶段模型架构

本文假设中压配电网的设备参数和运行状态均可获取,拓扑结构已知。低压配电网中安装分布式光伏和分布式储能的节点具有量测能力,并可以作为通信节点实现节点间的互相通信。本文提出的考虑分布式光伏和储能接入的中低压配电网两

阶段调度模型架构分为日前优化调度和日内滚动优化,如图1所示。

### 1) 日前优化调度。

本文针对光伏发电有功功率的预测误差生成大量场景集并将其削减为典型场景,考虑中低压配电网间的有功功率和无功功率交换,构建中低压配电网的集中式随机优化调度模型。调度时间窗口长度为24 h,时间间隔为1 h。通过日前优化调度可以预先安排各时段的网中OLTC分接头的挡位和CB投切组数,并给出接入中低压配电网的储能系统荷电状态(state of charge, SOC)参考值。

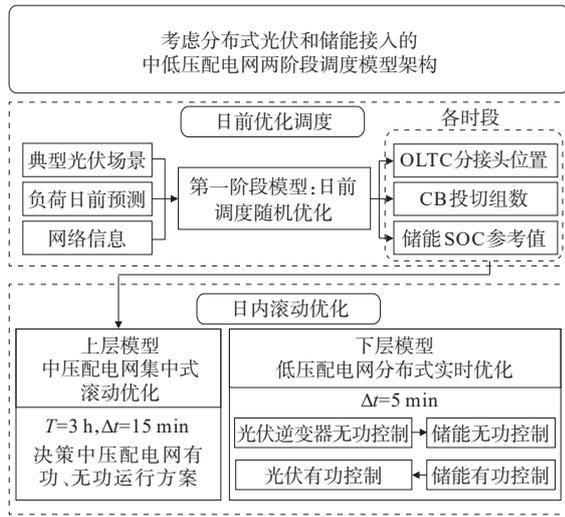


图1 考虑分布式光伏和储能接入的中低压配电网两阶段调度模型架构

Figure 1 Structure of two-stage dispatch model in MDN and LDN with distributed PV and BESS access

### 2) 日内滚动优化。

日内优化在日前优化结果的基础上进行,调度时间窗口选取  $T=3$  h。考虑中低压配电网优化调度的时间尺度不同,日内优化调度采用双层优化模型。上层模型为中压配电网集中优化模型,每15 min进行一次滚动优化,其中OLTC分接头的位置和CB的投切组数采用日前优化调度决策的结果,并且限制储能SOC的偏离范围。下层模型为低压配电网的分布式优化模型,每5 min执行一次,主要控制目标是消除低压配电网的节点电压越限。低压配电网根据量测节点的电压值选择执行光伏逆变器无功下垂控制、储能无功分布式控制、储能有功分布式控制以及光伏有功削减动作。

## 2 日前优化调度策略

日前优化调度策略考虑用光伏逆变器和储能

系统提供无功支撑,以网损、光伏弃用惩罚和储能充放电成本之和最小为目标函数,决策变量为未来一天内中压配电网中OLTC分接头位置、CB的投切组数以及储能的充放电功率,调度模型中包含中压配电网和低压配电网,在计算时统一进行求解。

### 2.1 典型光伏场景的生成

为考虑光伏出力不确定性的影响,本文以Beta分布刻画光伏出力的不确定性<sup>[19]</sup>,建立参数与预测出力相关的光伏实际出力概率分布模型;采用蒙特卡罗模拟法生成大量光伏出力场景集,并使用K-means聚类方法将其削减为典型场景<sup>[20]</sup>。

### 2.2 目标函数

中低压配电网日前优化模型的目标函数如下:

$$\min F_1 = \sum_{s \in \Omega_s} \omega_s (C_s^{\text{Aban}} + C_s^{\text{Loss}} + C_s^{\text{Bess}}) \quad (1)$$

$$C_s^{\text{Aban}} = \sum_{\phi \in \Phi} \sum_{i \in \Omega_{PV}} \sum_{t=1}^T \beta \pi_t (g_{s,i,t}^{\phi, PV} - P_{s,i,t}^{\phi, PV}) \Delta t \quad (2)$$

$$C_s^{\text{Loss}} = \sum_{\phi \in \Phi} \sum_{ij \in \Omega_e} \sum_{t=1}^T (I_{s,ij,t}^{\phi})^2 r_{ij}^{\phi} \Delta t \quad (3)$$

$$C_s^{\text{Bess}} = \sum_{\phi \in \Phi} \sum_{k \in \Omega_e} \sum_{t=1}^T \pi_t (P_{s,k,t}^{\phi, \text{ch}} - P_{s,k,t}^{\phi, \text{dis}}) \Delta t \quad (4)$$

式(1)~(4)中,  $\Omega_s$  为光伏出力的典型场景集;  $s$  为场景序号;  $\omega_s$  为场景  $s$  发生的概率;  $C_s^{\text{Aban}}$ 、 $C_s^{\text{Loss}}$ 、 $C_s^{\text{Bess}}$  分别表示场景  $s$  下配电网的光伏弃用惩罚、网络损耗和储能充放电成本;  $\Omega_{PV}$ 、 $\Omega_e$ 、 $\Omega_e$  分别为所有光伏、配电网支路以及储能的集合;  $T$  为调度时间周期;  $\Delta t$  为调度时间间隔; 在本文中,  $\Phi$  为相集合,在中压配电网中表示代替三相的单相,在低压配电网中表示三相集合  $\Phi = \{a, b, c\}$ ;  $\phi$  为相编号并且有  $\phi \in \Phi$ ,在中压配电网中  $\phi$  无特别含义并可忽略,在低压配电网中其所在变量代表接入  $\phi$  相的相关变量;  $\beta$  为光伏弃用惩罚系数;  $\pi_t$  为  $t$  时刻的电价,采用分时电价的模式;  $g_{s,i,t}^{\phi, PV}$ 、 $P_{s,i,t}^{\phi, PV}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻光伏  $i$  的预测有功功率和上网有功功率;  $I_{s,ij,t}^{\phi}$  为场景  $s$  下  $t$  时刻支路  $ij$  的电流;  $r_{ij}^{\phi}$  为支路  $ij$  的相电阻;  $P_{s,k,t}^{\phi, \text{ch}}$ 、 $P_{s,k,t}^{\phi, \text{dis}}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻储能系统  $k$  的充电功率和放电功率。

### 2.3 约束条件

#### 1) 光伏出力约束。

在日前优化阶段,中低压配电网中的光伏出力的有功功率和无功功率统一满足以下约束:

$$0 \leq P_{s,i,t}^{\phi, PV} \leq g_{s,i,t}^{\phi, PV} \quad (5)$$

$$-Q_{s,i,t}^{\phi, PV, \text{max}} \leq Q_{s,i,t}^{\phi, PV} \leq Q_{s,i,t}^{\phi, PV, \text{max}} \quad (6)$$

$$(P_{s,i,t}^{\phi, PV})^2 + (Q_{s,i,t}^{\phi, PV, \text{max}})^2 \leq (S_i^{\phi, PV})^2 \quad (7)$$

$$\eta_{\min}^{\text{PV}} \leq \frac{(P_{s,i,t}^{\phi,\text{PV}})^2}{(P_{s,i,t}^{\phi,\text{PV}})^2 + (Q_{s,i,t}^{\phi,\text{PV}})^2} \leq 1 \quad (8)$$

式(5)~(8)中,  $S_i^{\phi,\text{PV}}$  为光伏逆变器额定容量;  $Q_{s,i,t}^{\phi,\text{PV,max}}$ 、 $Q_{s,i,t}^{\phi,\text{PV}}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻光伏无功功率最大值和实际值;  $\eta_{\min}^{\text{PV}}$  为光伏的功率因数限值, 可根据配电台区实际电能质量以及光伏逆变器参数等因素取值。

## 2) 配电网潮流约束。

本文所提模型中, 中压配电网不考虑三相不平衡问题, 低压配电网考虑负荷、分布式光伏、分布式储能三相不平衡接入, 忽略相间阻抗耦合效应。潮流约束表示为

$$\sum_{k \in \Omega_{in}} P_{s,ki,t}^{\phi} + \sum_{j \in \Omega_{out}} (P_{s,ij,t}^{\phi} - L_{s,ij,t}^{\phi} r_{ij}^{\phi}) = P_{s,i,t}^{\phi,\text{in}} \quad (9)$$

$$\sum_{k \in \Omega_{in}} Q_{s,ki,t}^{\phi} + \sum_{j \in \Omega_{out}} (Q_{s,ij,t}^{\phi} - L_{s,ij,t}^{\phi} x_{ij}^{\phi}) = Q_{s,i,t}^{\phi,\text{in}} \quad (10)$$

$$P_{s,i,t}^{\phi,\text{in}} = P_{s,i,t}^{\phi,\text{G}} + P_{s,i,t}^{\phi,\text{PV}} + P_{s,i,t}^{\phi,\text{dis}} - P_{s,i,t}^{\phi,\text{ch}} - P_{s,i,t}^{\phi,\text{L}} \quad (11)$$

$$Q_{s,i,t}^{\phi,\text{in}} = Q_{s,i,t}^{\phi,\text{G}} + Q_{s,i,t}^{\phi,\text{PV}} + Q_{s,i,t}^{\phi,\text{Bess}} + Q_{s,i,t}^{\phi,\text{CB}} - Q_{s,i,t}^{\phi,\text{L}} \quad (12)$$

$$L_{s,ij,t}^{\phi} = (I_{s,ij,t}^{\phi})^2 \quad (13)$$

$$U_{s,i,t}^{\phi} = (V_{s,i,t}^{\phi})^2 \quad (14)$$

$$U_{s,i,t}^{\phi} - U_{s,j,t}^{\phi} = 2 \cdot (r_{ij}^{\phi} P_{s,ij,t}^{\phi} + x_{ij}^{\phi} Q_{s,ij,t}^{\phi}) - [(r_{ij}^{\phi})^2 + (x_{ij}^{\phi})^2] L_{s,ij,t}^{\phi} \quad (15)$$

$$\left\| \begin{array}{l} 2P_{s,ij,t}^{\phi} \\ 2Q_{s,ij,t}^{\phi} \\ L_{s,ij,t}^{\phi} - U_{s,ij,t}^{\phi} \end{array} \right\|_2 \leq L_{s,ij,t}^{\phi} + U_{s,ij,t}^{\phi} \quad (16)$$

$$(P_{s,ij,t}^{\phi})^2 + (Q_{s,ij,t}^{\phi})^2 \leq (S_{ij}^{\phi})^2 \quad (17)$$

$$V_{s,\delta,t}^{\phi} = V_t^{\text{R}} \quad (18)$$

$$V_{\min} \leq V_{s,i,t}^{\phi} \leq V_{\max} \quad (19)$$

式(9)~(19)中,  $\Omega_{\text{toi}}$ 、 $\Omega_{\text{fromi}}$  分别为流入节点  $i$  和从节点  $i$  流出的节点集合;  $P_{s,ij,t}^{\phi}$ 、 $Q_{s,ij,t}^{\phi}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻从节点  $i$  流向节点  $j$  的线路  $ij$  的有功、无功功率(若下标为  $ki$  表示从节点  $k$  流向节点  $i$ );  $S_{ij}^{\phi}$  为线路  $ij$  的额定传输容量;  $r_{ij}^{\phi}$ 、 $x_{ij}^{\phi}$  分别为线路  $ij$  的相电阻和相电抗;  $P_{s,i,t}^{\phi,\text{in}}$ 、 $P_{s,i,t}^{\phi,\text{G}}$ 、 $P_{s,i,t}^{\phi,\text{PV}}$ 、 $P_{s,i,t}^{\phi,\text{dis}}$ 、 $P_{s,i,t}^{\phi,\text{ch}}$ 、 $P_{s,i,t}^{\phi,\text{L}}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  的总注入、发电机、光伏、储能放电、储能充电以及负荷的有功功率;  $Q_{s,i,t}^{\phi,\text{in}}$ 、 $Q_{s,i,t}^{\phi,\text{G}}$ 、 $Q_{s,i,t}^{\phi,\text{PV}}$ 、 $Q_{s,i,t}^{\phi,\text{Bess}}$ 、 $Q_{s,i,t}^{\phi,\text{CB}}$ 、 $Q_{s,i,t}^{\phi,\text{L}}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  的总注入、发电机、光伏、储能、补偿电容器以及负荷的无功功率;  $I_{s,ij,t}^{\phi}$ 、 $V_{s,i,t}^{\phi}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻线路  $ij$  的传输电流以及节点  $i$  的电压;  $\delta$  为平衡节点编号;  $V_t^{\text{R}}$ 、 $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  分别为  $t$  时刻根节点电压参考值、下限值和上限值;  $L_{s,ij,t}^{\phi}$ 、 $U_{s,i,t}^{\phi}$  为引入的辅助变量, 目的是将模型中的二次项线性化。式(16)将潮流方程的非线性部分松弛为二阶锥规划(second-order

cone programming, SOCP)的形式, 可以使用商用求解器直接求解。式(18)仅用来约束中压配电网的根节点电压。

## 3) 储能运行约束。

$$s_{s,k,t}^{\phi,\text{ch}} + s_{s,k,t}^{\phi,\text{dis}} \leq 1, s_{s,k,t}^{\phi,\text{ch}}, s_{s,k,t}^{\phi,\text{dis}} \in \{0, 1\} \quad (20)$$

$$0 \leq P_{s,k,t}^{\phi,\text{ch}} \leq s_{s,k,t}^{\phi,\text{ch}} P_k^{\phi} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{s,k,t}^{\phi,\text{dis}} \leq s_{s,k,t}^{\phi,\text{dis}} P_k^{\phi} \quad (22)$$

$$-\sqrt{(S_k^{\phi})^2 - (P_{s,k,t}^{\phi,\text{Bess}})^2} \leq Q_{s,k,t}^{\phi,\text{Bess}} \leq \sqrt{(S_k^{\phi})^2 - (P_{s,k,t}^{\phi,\text{Bess}})^2} \quad (23)$$

$$-Q_k^{\phi} \leq Q_{s,k,t}^{\phi,\text{Bess}} \leq Q_k^{\phi} \quad (24)$$

$$E_{s,k+1,t}^{\phi} = E_{s,k,t}^{\phi} + \eta_c P_{s,k,t}^{\phi,\text{ch}} \Delta t - \frac{1}{\eta_d} P_{s,k,t}^{\phi,\text{dis}} \Delta t \quad (25)$$

$$E_k^{\phi} S_{\text{SOC}, \min} \leq E_{s,k,t}^{\phi} \leq E_k^{\phi} S_{\text{SOC}, \max} \quad (26)$$

$$E_{s,k,0}^{\phi} = E_{s,k,T}^{\phi} \quad (27)$$

式(20)~(27)中,  $s_{s,k,t}^{\phi,\text{ch}}$ 、 $s_{s,k,t}^{\phi,\text{dis}}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻储能设备  $k$  的充电标志变量和放电标志变量;  $P_k^{\phi}$ 、 $Q_k^{\phi}$ 、 $S_k^{\phi}$ 、 $E_k^{\phi}$  分别为储能设备  $k$  的额定有功功率、额定无功功率、额定视在功率和额定容量;  $Q_{s,k,t}^{\phi,\text{Bess}}$  为场景  $s$  下  $t$  时刻系统  $k$  的储能无功功率;  $E_{s,k,t}^{\phi}$  为场景  $s$  下  $t$  时刻储能设备  $k$  的储存电量;  $\eta_c$ 、 $\eta_d$  分别为电池储能的充电效率和放电效率;  $S_{\text{SOC}, \min}$ 、 $S_{\text{SOC}, \max}$  分别为电池储能运行的 SOC 下限值和上限值。为充分发挥储能的无功支撑能力, 本文不对功率因数进行限制, 式(27)表示储能运行状态的连续性。

## 4) 中压 OLTC 约束。

中压 OLTC 约束如下:

$$N_{\min}^{\text{OLTC}} \leq N_t^{\text{OLTC}} \leq N_{\max}^{\text{OLTC}}, N_t^{\text{OLTC}} \in \mathbf{Z} \quad (28)$$

$$\sum_{t \in T} |N_t^{\text{OLTC}} - N_{t-1}^{\text{OLTC}}| \leq \gamma_{\max}^{\text{OLTC}} \quad (29)$$

$$V_t^{\text{R}} = V_N (1 + N_t^{\text{OLTC}} \Delta \bar{V}) \quad (30)$$

式(28)~(30)中,  $N_t^{\text{OLTC}}$  为  $t$  时刻 OLTC 分接头的位置;  $N_{\min}^{\text{OLTC}}$ 、 $N_{\max}^{\text{OLTC}}$  分别为 OLTC 分接头最小挡位和最大挡位;  $\Delta \bar{V}$  为 OLTC 分接头的电压调节步长标幺值;  $\gamma_{\max}^{\text{OLTC}}$  为 OLTC 在调度周期内最大调节次数;  $V_N$  为 OLTC 一次侧参考电压。其中, 式(29)为非线性约束, 通过引入辅助变量  $N_t^{\text{so}}$  转换为如下的线性约束形式:

$$\begin{cases} N_t^{\text{so}} \geq 0 \\ N_t^{\text{so}} \geq N_t^{\text{OLTC}} - N_{t-1}^{\text{OLTC}} \\ N_t^{\text{so}} \geq -N_t^{\text{OLTC}} + N_{t-1}^{\text{OLTC}} \end{cases} \quad (31)$$

$$\sum_{t \in T} N_t^{\text{so}} \leq \gamma_{\max}^{\text{OLTC}} \quad (32)$$

## 5) 中压 CB 约束。

中压 CB 约束如下:

$$0 \leq N_t^{\text{CB}} \leq N_{\text{max}}^{\text{CB}}, N_t^{\text{CB}} \in \mathbf{Z} \quad (33)$$

$$\sum_{t \in T} |N_t^{\text{CB}} - N_{t-1}^{\text{CB}}| \leq \gamma_{\text{max}}^{\text{CB}} \quad (34)$$

$$Q_{s,\phi,t}^{\text{CB}} = N_t^{\text{CB}} \Delta Q^{\text{CB}} \quad (35)$$

式(33)~(35)中,  $N_t^{\text{CB}}$  为  $t$  时刻 CB 的投切组数;  $N_{\text{max}}^{\text{CB}}$  为 CB 的最大投切组数;  $\gamma_{\text{max}}^{\text{CB}}$  为 CB 在调度周期内最大调节次数;  $\Delta Q^{\text{CB}}$  为单组 CB 的额定容量。其中, 式(34)为非线性约束, 使用与式(29)同样的方法引入辅助变量  $N_t^{\text{sc}}$  转换为线性约束:

$$\begin{cases} N_t^{\text{sc}} \geq 0 \\ N_t^{\text{sc}} \geq N_t^{\text{CB}} - N_{t-1}^{\text{CB}} \\ N_t^{\text{sc}} \geq -N_t^{\text{CB}} + N_{t-1}^{\text{CB}} \end{cases} \quad (36)$$

$$\sum_{t \in T} N_t^{\text{sc}} \leq \gamma_{\text{max}}^{\text{CB}} \quad (37)$$

### 6) 中低压配电网功率交换。

将低压配电网等效为负荷连接在中压配电网的指定节点处, 满足以下约束:

$$P_{s,n,t}^{\text{L}} = \sum_{\phi \in \Phi} P_{s,l,t}^{\phi, \text{G}, \text{low}} \quad (38)$$

$$Q_{s,n,t}^{\text{L}} = \sum_{\phi \in \Phi} Q_{s,l,t}^{\phi, \text{G}, \text{low}} \quad (39)$$

$$V_{s,l,t}^{\phi, \text{low}} = V_{s,n,t}^{\text{L}} \quad (40)$$

式(38)~(40)中,  $P_{s,n,t}^{\text{L}}$ 、 $Q_{s,n,t}^{\text{L}}$ 、 $V_{s,n,t}^{\text{L}}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻连接低压配电网  $l$  的中压配电网节点  $n$  处的等效有功负荷、无功负荷和节点电压;  $P_{s,l,t}^{\phi, \text{G}, \text{low}}$ 、 $Q_{s,l,t}^{\phi, \text{G}, \text{low}}$ 、 $V_{s,l,t}^{\phi, \text{low}}$  分别为场景  $s$  下  $t$  时刻低压配电网  $l$  的  $\phi$  相等效根节点发电机输出有功功率、无功功率和节点电压。

## 3 日内滚动优化调度策略

### 3.1 日内分层优化流程

图2展示了中低压配电网日内滚动优化流程。在执行上层优化时, 低压配电网等效为中压配电网的一个负荷节点, 中压配电网根据低压侧上传的光伏和负荷信息建立 MISOPCP 模型进行集中优化。

下层低压配电网优化采用分布式调度模型, 主要控制目标为消除电压越限。模型首先检查光伏并网点的电压越限情况, 进行基于下垂控制的光伏逆变器无功就地实时控制。此时电压越限问题若不能被消除, 则进一步执行储能分布式控制: 由低压通信节点间交互数据确定电压越限最严重的量测节点作为主导节点, 基于主导节点电压-无功灵敏度的大小, 顺序控制储能的无功功率, 直至电压越限被消除或所有分布式储能没有可用的无功容量。若仍存在电压越限情况, 则基于主导节点电压-有功灵敏度的大小顺序控制储能的有功功率。若储能功率控制

无法完全消除电压越限, 则逐次实施光伏有功功率削减, 每次增加 5% 光伏总出力的削减量。所有步骤执行完毕后得到中压配电网中储能充放电功率和低压分布式光伏和储能的功率控制方案。

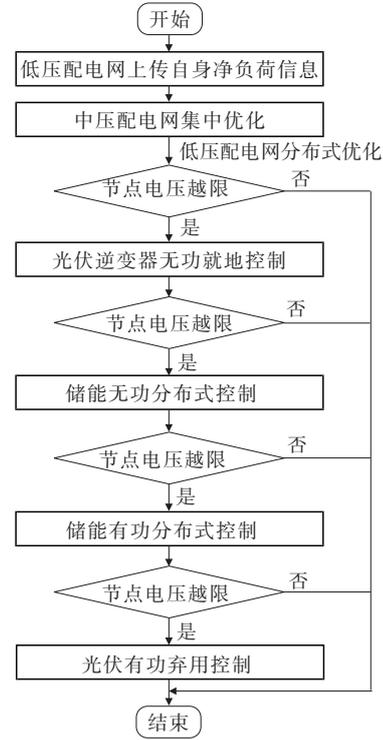


图2 中低压配电网日内滚动优化流程

Figure 2 Intra-day rolling optimization process of MDN and LDN

### 3.2 中压配电网集中优化

在日内滚动优化时间窗口内, 以中压配电网的光伏弃用惩罚和网损成本最小为目标函数建立 MISOPCP 模型, 目标函数设置为

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{n \in \Omega_{\text{PV}}} \beta (g_{n,t}^{\text{PV}} - P_{n,t}^{\text{PV}}) + \sum_{ij \in \Omega_{\text{L}}} I_{ij,t}^2 r_{ij} \right) \pi_t \Delta t \quad (41)$$

式中, 相关变量含义与日前优化模型中对应变量含义相同。约束条件除式(5)~(25)、(30)、(35)外, 增加储能设备日内 SOC 运行范围约束如下:

$$(1 - \delta_s) S_{\text{SOC},k,t}^{\text{Ref}} \leq S_{\text{SOC},k,t} \leq (1 + \delta_s) S_{\text{SOC},k,t}^{\text{Ref}} \quad (42)$$

$$S_{\text{SOC},k,t}^{\text{Ref}} = \sum_{s \in \Omega} \omega_s S_{\text{SOC},k,t} \quad (43)$$

式(42)、(43)中,  $S_{\text{SOC},k,t}^{\text{Ref}}$  为日前优化调度模型得到的  $t$  时刻储能设备  $k$  的 SOC 参考值;  $\delta_s$  为设置的 SOC 允许偏离系数。

### 3.3 低压配电网分布式优化

#### 3.3.1 光伏逆变器无功就地控制

分布式光伏有功功率和可调无功容量满足

式(5)~(8)所示的约束条件。根据文献[21-22],光伏逆变器的无功调节成本仅为0.067元/(kVar·h),远低于储能设备的运行成本,因此在发生电压越限时优先进行光伏逆变器的无功控制。在限制光伏并网功率因数的前提下,采用光伏逆变器调整无功功率的方式来调节光伏并网点电压,在节点电压偏高时吸收无功功率,在节点电压偏低时发出无功功率。光伏逆变器的调节模式设置为传统的下垂控制,直接采集并网点的电压信息,根据电压越限情况和预先设置好的下垂系数确定光伏逆变器本地输出的无功功率变化值<sup>[23]</sup>,下垂曲线如图3所示。

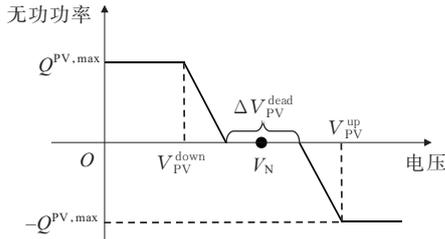


图3 光伏逆变器电压-无功下垂曲线

Figure 3 Voltage-reactive power sag curve of PV inverter

考虑光伏逆变器的调节灵敏度和调节损耗,设置电压死区  $\Delta V_{PV}^{dead}$ ,当电压在预期电压  $V_N$  附近范围  $[V_N - 0.5\Delta V_{PV}^{dead}, V_N + 0.5\Delta V_{PV}^{dead}]$  波动时,光伏逆变器无须改变无功功率;当电压偏移超出电压死区时,进行光伏逆变器调节,而当电压超过设置的上限值  $V_{PV}^{up}$  或低于下限值  $V_{PV}^{down}$  时,光伏逆变器的无功功率直接调整至上、下限。下垂控制方程如下:

$$\Delta Q_{i,t}^{PV} = \begin{cases} Q_{n,t}^{PV,max}, & V_{n,t} \leq V_{PV}^{down} \\ s_{PV}(V_{i,t} - V_N + 0.5\Delta V_{PV}^{dead}), & V_{PV}^{down} \leq V_{i,t} \leq V_N - 0.5\Delta V_{PV}^{dead} \\ 0, & V_N - 0.5\Delta V_{PV}^{dead} \leq V_{i,t} \leq V_N + 0.5\Delta V_{PV}^{dead} \\ s_{PV}(V_{i,t} - V_N - 0.5\Delta V_{PV}^{dead}), & V_N + 0.5\Delta V_{PV}^{dead} \leq V_{i,t} \leq V_{PV}^{up} \\ -Q_{i,t}^{PV,max}, & V_{i,t} \geq V_{PV}^{up} \end{cases} \quad (44)$$

$$s_{PV} = -\frac{Q_{i,t}^{PV,max}}{V_N - 0.5\Delta V_{PV}^{dead} - V_{PV}^{down}} \quad (45)$$

$$Q_{i,t}^{PV} = \begin{cases} Q_{i,t}^{PV,max}, & Q_{i,t-1}^{PV} + \Delta Q_{i,t}^{PV} \geq Q_{i,t}^{PV,max} \\ Q_{i,t-1}^{PV} + \Delta Q_{i,t}^{PV}, & -Q_{i,t}^{PV,max} < Q_{i,t-1}^{PV} + \Delta Q_{i,t}^{PV} < Q_{i,t}^{PV,max} \\ -Q_{i,t}^{PV,max}, & Q_{i,t-1}^{PV} + \Delta Q_{i,t}^{PV} \leq -Q_{i,t}^{PV,max} \end{cases} \quad (46)$$

式(44)~(46)中,  $Q_{n,t}^{PV,max}$  为光伏逆变器能够输出的最大无功功率;  $\Delta Q_{i,t}^{PV}$ 、 $Q_{i,t}^{PV}$  分别为光伏逆变器的无功变化值和实际值;  $s_{PV}$  为下垂系数。相关变量以设备自身编号作为下标加以区分。

### 3.3.2 低压分布式储能的无功功率控制

储能设备被设置为四象限运行的工作模式,在白天因光伏出力较大而发生电压问题时吸收有功和无功,在夜晚因光伏发电缺失而出现低电压问题时发出有功和无功。由于储能无功调节成本远低于有功运行成本,在调用时优先执行无功控制。本文通过预先设置的电压-无功灵敏度、电压-有功灵敏度来确定储能输出的有功和无功功率。

低压配电网的电压灵敏度因子通常不会随着运行状态的改变发生较大变化,表达式<sup>[24]</sup>如下:

$$\begin{cases} S_Q = \frac{\partial V}{\partial Q} \\ S_P = \frac{\partial V}{\partial P} \end{cases} \quad (47)$$

式中,  $S_Q$ 、 $S_P$  分别为节点电压-无功和电压-有功灵敏度因子矩阵;  $V$ 、 $P$ 、 $Q$  分别为节点电压、注入有功功率和注入无功功率向量。电压灵敏度可通过求解电网潮流的雅可比矩阵的逆矩阵得到,对于缺少网络参数的低压配电网,可通过分析历史数据得到。此外,还需考虑储能的SOC和功率范围等约束条件才能最终确定储能的有功功率和无功功率。假设低压配电网侧安装了  $n$  台储能设备,储能无功控制过程<sup>[10]</sup>如下。

1) 低压配电网中的首个储能(量测)节点检测自身电压幅值并将自身状态传递给下一个储能节点;该储能节点对二者电压越限程度进行比较,将越限更严重节点的信息继续向下传递,直至遍历所有的储能节点;由最后一个储能节点确定主导节点编号并将其信息传递给所有的储能节点。

2) 优先进行储能无功本地控制,根据电压-无功灵敏度因子计算无功功率增量  $\Delta Q_{k,t}^{Bess}$  如下:

$$\Delta Q_{k,t}^{Bess} = \frac{V_{i,t} - V_{obj}}{S_{Q,ij}} \quad (48)$$

式中,  $S_{Q,ij}$  为主导节点  $i$  对节点  $j$  的电压-无功灵敏度,进行本地控制时  $i=j$ 。储能设备检测自身无功出力状态,确定实际无功功率  $Q_{k,t}^{Bess}$  如下:

$$Q_{k,t}^{Bess} = \begin{cases} Q_k, & Q_{k,t-1}^{Bess} + \Delta Q_k^{Bess} \geq Q_k \\ Q_{k,t-1}^{Bess} + \Delta Q_k^{Bess}, & \text{其他} \\ -Q_k, & Q_{k,t-1}^{Bess} + \Delta Q_k^{Bess} \leq -Q_k \end{cases} \quad (49)$$

3) 若控制后仍有电压越限,选择除步骤2)中节点外电压-无功灵敏度最大节点重复步骤2)的无功控制,直至电压越限消除或所有节点的储能无可用无功功率。

### 3.3.3 低压分布式储能的有功功率控制

储能的分布式无功控制可能无法完全消除节点过电压问题,因此需进一步执行储能的分布式有功控制,控制过程与无功控制类似,除满足功率限制外还需满足储能的SOC约束,储能有功控制的过程如下。

1) 按低压分布式储能的无功功率控制的步骤1)确定主导节点。

2) 优先进行储能有功本地控制,根据电压-有功灵敏度因子计算有功功率增量如下:

$$\Delta P_{k,t}^{\text{Bess}} = \frac{V_{k,t} - V_{\text{obj}}}{S_{P,ij}} \quad (50)$$

式中,  $S_{P,ij}$  为主导节点  $i$  对节点  $j$  的电压-有功灵敏度,进行本地控制时  $i=j$ ;  $V_{\text{obj}}$  为控制后的电压目标值。储能设备检测自身有功出力状态,确定满足功率约束的有功功率为

$$P_{k,t}^{\text{Bess,p}} = \begin{cases} P_k, & P_{k,t-1}^{\text{Bess}} + \Delta P_{k,t}^{\text{Bess}} \geq P_k \\ P_{k,t-1}^{\text{Bess}} + \Delta P_{k,t}^{\text{Bess}}, & \text{其他} \\ -P_k, & P_{k,t-1}^{\text{Bess}} + \Delta P_{k,t}^{\text{Bess}} \leq -P_k \end{cases} \quad (51)$$

由于储能设备的充放电功率还与SOC有关,因此根据上述控制得到的储能充放电状态以及SOC约束可以得到满足功率范围约束和SOC约束的实际有功功率。

当  $P_{k,t}^{\text{Bess,p}} \leq 0$  时,计算下一时刻的SOC如下:

$$S_{\text{SOC},k,t}^{\text{p}} = S_{\text{SOC},k,t-1} + \frac{\eta_c P_{k,t}^{\text{Bess,p}} \Delta t}{E_k} \quad (52)$$

式中,  $S_{\text{SOC},k,t-1}$  为储能设备  $k$  在  $t-1$  时刻的SOC实际值;  $S_{\text{SOC},k,t}^{\text{p}}$  为当前充放电功率决策值下SOC的预期值。根据储能的SOC约束可以得到最终的实际有功功率  $P_{k,t}^{\text{Bess}}$  如下:

$$P_{k,t}^{\text{Bess}} = \begin{cases} P_{k,t}^{\text{Bess,p}}, & S_{\text{SOC},k,t}^{\text{p}} \leq S_{\text{SOC,max}} \\ \frac{E_k (S_{\text{SOC,max}} - S_{\text{SOC},k,t}^{\text{p}})}{\eta_c \Delta t}, & \text{其他} \end{cases} \quad (53)$$

当  $P_{k,t}^{\text{Bess,p}} > 0$  时,计算下一时刻的SOC如下:

$$S_{\text{SOC},k,t}^{\text{p}} = S_{\text{SOC},k,t-1} - \frac{P_{k,t}^{\text{Bess,p}} \Delta t}{\eta_d E_k} \quad (54)$$

实际有功功率  $P_{k,t}^{\text{Bess}}$  为

$$P_{k,t}^{\text{Bess}} = \begin{cases} P_{k,t}^{\text{Bess,p}}, & S_{\text{SOC},k,t}^{\text{p}} \geq S_{\text{SOC,min}} \\ \frac{\eta_d E_k (S_{\text{SOC},k,t}^{\text{p}} - S_{\text{SOC,min}})}{\Delta t}, & \text{其他} \end{cases} \quad (55)$$

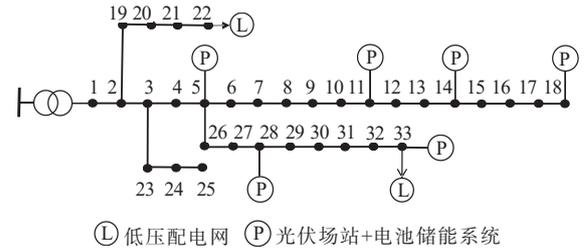
3) 若控制后仍有电压越限,选择除步骤2)中节

点外电压-有功灵敏度最大的节点重复步骤2)的有功控制,直至电压越限消除或所有节点的储能没有可用的有功功率或容量。

## 4 算例分析

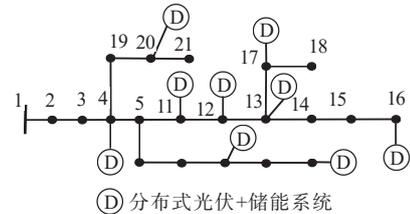
### 4.1 算例设置

以改进的IEEE 33节点中压配电系统和21节点低压配电系统作为测试系统进行仿真分析,配电网结构如图4所示。中压配电网系统基准电压为12.66 kV,容量基值为1 MV·A,OLTC挡位数设置为11,调节步长为0.01 p.u.;节点18、22安装CB,每组容量设置为60 kVar,最大组数为5;节点5、11、14、18、28、33安装光伏和储能,容量见表1;节点22、33分别接入低压配电网。低压配电网系统基准电压为380 V,容量基值为1 MV·A,光伏和储能单相或多相接入并且作为量测节点,其位置与文献[16]相同,基准有功负荷见表2,无功负荷设置为有功负荷的0.4倍。光伏逆变器的额定容量设置为光伏额定有功功率的1.05倍,功率因数限值设置为超前(滞后)0.95。中压配电网节点电压安全范围设置为[0.95,1.05] p.u.,低压配电网设置为[0.93,1.07] p.u.。在两阶段优化过程中,假设低压配电网线路阻抗信息未知,日前优化采用预设的参数进行计算。



Ⓛ 低压配电网 Ⓟ 光伏场站+电池储能系统

(a) 中压配电网



Ⓧ 分布式光伏+储能系统

(b) 低压配电网

图4 中低压配电网网络结构

Figure 4 Structures of MDN and LDN

按照文2.1的方法生成光伏出力典型场景集,场景数设置为2000,典型场景数设置为5。图5展示了光伏和负荷有功功率,其中图5(a)为中低压配电网的日前负荷和光伏发电预测功率曲线,图5(b)为削减后的光伏出力典型场景。

表1 IEEE 33节点中压配电系统光伏和储能额定容量

Table 1 Rated capacity of PV and BESS in IEEE 33-bus MDN

| 节点 | 光伏有功/<br>kW | 储能有功/<br>kW | 储能无功/<br>kW | 储能容量/<br>(kW·h) |
|----|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| 5  | 600         | 180         | 50          | 360             |
| 11 | 700         | 210         | 60          | 420             |
| 14 | 900         | 270         | 90          | 540             |
| 18 | 900         | 270         | 90          | 540             |
| 28 | 300         | 90          | 30          | 180             |
| 33 | 300         | 90          | 30          | 180             |

表2 21节点低压配电系统基准负荷

Table 2 Benchmark load of 21-bus LDN

| 节点 | A相有功/kW | B相有功/kW | C相有功/kW |
|----|---------|---------|---------|
| 1  | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| 2  | 2.905   | 2.870   | 1.575   |
| 3  | 2.590   | 2.520   | 3.920   |
| 4  | 2.240   | 2.975   | 2.170   |
| 5  | 1.960   | 4.095   | 2.940   |
| 6  | 5.320   | 8.190   | 0.000   |
| 7  | 4.760   | 5.075   | 6.720   |
| 8  | 8.190   | 5.180   | 4.235   |
| 9  | 6.125   | 5.460   | 4.305   |
| 10 | 4.340   | 2.975   | 2.380   |
| 11 | 3.080   | 4.340   | 3.500   |
| 12 | 0.000   | 5.250   | 3.955   |
| 13 | 3.010   | 3.430   | 2.345   |
| 14 | 2.695   | 5.845   | 1.295   |
| 15 | 2.275   | 2.975   | 3.500   |
| 16 | 4.970   | 0.000   | 3.710   |
| 17 | 1.855   | 2.730   | 3.465   |
| 18 | 2.345   | 1.610   | 1.925   |
| 19 | 5.425   | 5.425   | 6.125   |
| 20 | 2.695   | 6.965   | 5.040   |
| 21 | 4.655   | 5.040   | 3.465   |

### 4.2 日前优化仿真分析

仿真分析采用以下3种调度方案进行对比。

1) 方案1:不考虑储能接入且不采取任何调控控制策略。

2) 方案2:采用传统的集中式优化控制思路,将低压配电网接入点看作负荷节点进行优化。

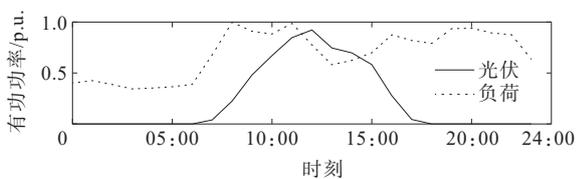
3) 方案3:采用本文提出的考虑光伏出力不确定性的中低压配电网日前集中优化调度模型。

表3给出了不同方案下的网损和电压越限情况,当采用随机优化方法时计算节点电压越限数量应除以典型场景数,低压配电网统计每相的节点电压越限数量。从表3可以看出,在分布式光伏接入中低压配电网后若不采取任何调度策略,网损成本为1793.37元,而调度方案2和方案3均可以有效降低网损成本。在改善节点电压越限问题上,方案1的中压配电网、低压配电网节点电压在全天中的越限占比分别为17.42%和34.76%;方案2只能控制中压配电网的节点电压不越限,在低压配电网中仍有8.27%的节点电压越限;而方案3中所有场景下的中低压配电网都没有出现节点电压越限情况。因此,虽然使用方案2的分层优化方法的网损成本比本文方法略低,但无法消除低压配电网的节点电压越限问题。这表明使用本文所提出的日前集中优化方法可以考虑中低压配电网全局运行情况,在制定调度方案时充分利用各资源的调节能力,将中低压节点电压控制在安全范围内。

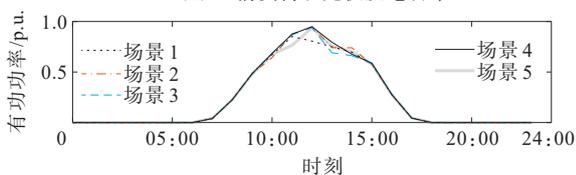
表3 不同日前优化方案下中低压配电网网损和电压越限数量(时间间隔1h)

Table 3 Network loss and overvoltage frequency of MDN and LDN under different day-ahead optimization methods (interval is 1 h)

| 调度方案 | 网损成本/元  | 中压配电网节点<br>电压越限数量 | 低压配电网节点<br>电压越限数量 |
|------|---------|-------------------|-------------------|
| 1    | 1793.37 | 138               | 1051              |
| 2    | 1236.41 | 0                 | 250               |
| 3    | 1241.88 | 0                 | 0                 |



(a) 日前负荷和光伏发电功率



(b) 削减后的光伏出力典型场景

图5 光伏和负荷有功功率

Figure 5 Active power of PV and load

图6为方案3得到的OLTC分接头位置曲线,图7为CB投切组数。从图6、7可以看出,在白天光伏出力较大时,OLTC分接头调至较低档位来降低网络整体电压;而在夜晚光伏出力较少的时间段中,OLTC分接头调至较高档位抬升网络整体电

压。此外,在光伏大发时段节点电压较高,接入光伏的节点 18 处的 CB 不需要投入,而在夜晚由于光伏出力为 0,节点 18 处的 CB 需投入使用以抬升节点电压;节点 33 处的 CB 在一天内保持着较高的投入组数,这是因为节点 33 处于中压配电网的末端,电压降落较大,需要补偿足够的无功功率来抬升节点电压。

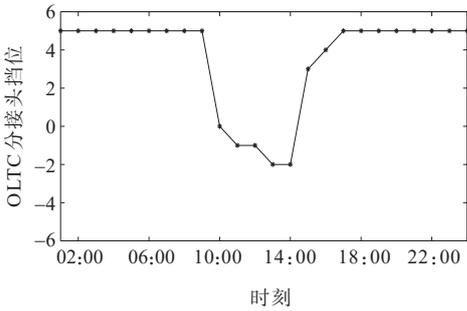


图 6 OLTC 分接头位置

Figure 6 Tap position of OLTC

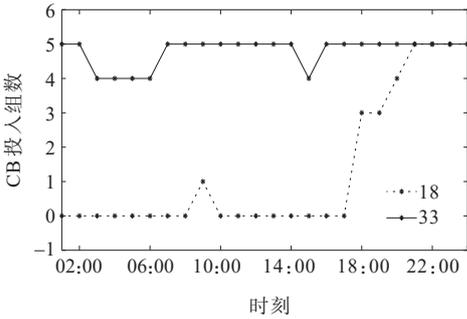


图 7 CB 投切组数

Figure 7 Number of switching groups of CB

图 8 为方案 3 得到的日前中压配电网储能 SOC 优化结果,图例的数字代表储能的安装位置。由于本文考虑了分时电价,储能除了调节系统电压外还具有价格套利的作用。由图 8 可以看出,在 00:00—06:00 电价较低,中压配电网具有足够的调节裕量,储能系统处于充电状态;在 06:00—09:00 时间段,由于电价没有达到峰值,储能放电的套利收益较低,并且网络没有调压需求,储能系统处于停运状态;在 09:00—12:00,光伏出力没有达到峰值,并且电价较高,储能可以进行放电套利并且保证节点电压不越上限。此外,储能在 14:00—16:00 的平价时间段充电并降低节点电压,在 18:00—20:00 的峰时电价时间段放电套利并提升节点电压。日前优化模型决策的储能 SOC 状态作为日内中压配电网储能运行的参考值,在滚动优化阶段也能保证一定的套利收益。

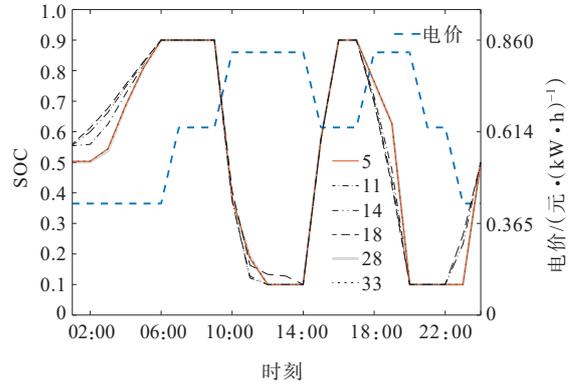


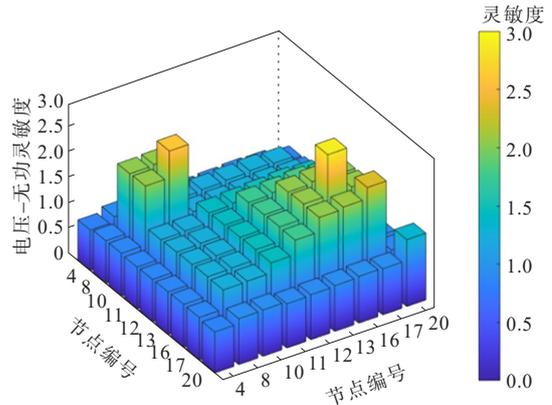
图 8 日前中压配电网储能 SOC 曲线

Figure 8 Day-ahead SOC curve of BESS in MDN

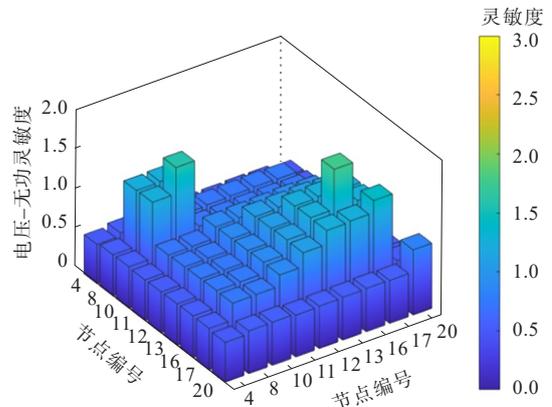
### 4.3 日内仿真分析

#### 4.3.1 低压配电网电压-有功/无功灵敏度分析

在实际调度情景中,低压配电网的电压-有功灵敏度和电压-无功灵敏度可以通过分析历史运行数据得到。本文基于设定的网络参数和额定负荷生成大量运行场景,通过求取平均值的方式得到量测节点间的电压-有功灵敏度和电压-无功灵敏度,结果如图 9 所示。



(a) 电压-有功灵敏度



(b) 电压-无功灵敏度

图 9 低压配电网量测节点电压灵敏度

Figure 9 Voltage sensitivity of measuring buses in LDN

### 4.3.2 仿真设置与结果分析

为验证所提中低压配电网日内优化调度模型的有效性,本文设置以下3种不同日内调度方案。

1) 方案4:不考虑储能接入且不采取任何控制策略。

2) 方案5:采用本文制定的日前调度方案直接作为日内的运行策略。

3) 方案6:采用本文提出的日内双层调度策略。

表4对比了3种方案下量测节点电压越限节点数量,图10给出了调度方案6下的低压配电网B相量测节点电压曲线。若不采取任何调度策略,在日内将会有17.14%的中压配电网的节点电压和16.95%的低压配电网的节点电压越限。在方案5中这2个比例分别变为1.63%和3.84%,说明日前优化调度的决策结果可能难以满足日内实时调度的要求。而采用本文提出的日内集中-分布式调度方案可以将中低压配电网量测节点的电压控制在安全范围内,实现分布式光伏和储能的协同运行。

表4 不同日内优化方案下中压配电网节点电压越限数量(时间间隔5 min)

Table 4 Overtoltage frequency of buses in MDN under different intra-day optimization methods (interval is 5 min)

| 调度方案 | 中压配电网节点电压越限数量 | 低压配电网量测节点电压越限数量 |
|------|---------------|-----------------|
| 4    | 1 629         | 6 152           |
| 5    | 155           | 1 395           |
| 6    | 0             | 0               |

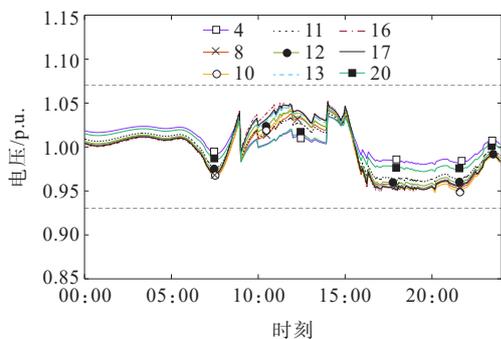


图10 日内优化策略下接入中压22节点的低压配电网B相量测节点电压

Figure 10 B-phase voltage of measuring buses in LDN connected to bus 22 of MDN under intra-day optimization strategy

图11展示了本文日内优化策略下接入中压22节点的低压配电网B相的光伏逆变器和储能日内运行策略。

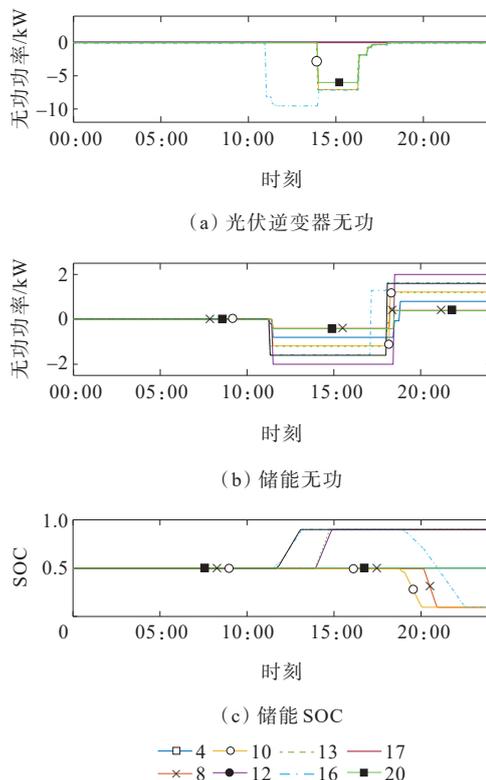


图11 接入中压22节点的低压配电网B相光伏逆变器和储能日内运行策略

Figure 11 Operation strategy of B-phase PV inverter and BESS in LDN connected to bus 22 of MDN

可以看出,由于B相接入了的光伏和负荷较大,在日内面临着较大的调压需求:在00:00—10:00,低压配电网负荷较低,此时仅靠调节OLTC分接头就可以保证低压量测节点电压不越限;在11:00—18:00光伏的高出力抬升了并网点电压,光伏逆变器依据下垂曲线调整至吸收无功功率的工作模式,并且此时储能系统吸收无功和有功功率来降低节点电压;在18:00以后光伏出力降为0而负荷处于较高水平,由于功率因数的限制光伏逆变器无法进行无功调节,只能通过储能系统发出无功功率和有功功率来提升电压。在本算例中,光伏有功的削减量为0,说明所提方法可以有效减少弃光现象。此外,由于A相和C相接入了的光伏和负荷较少,在日内几乎没有出现电压越限现象,因此仅靠光伏逆变器和储能的无功控制以及小部分储能有功控制即可解决电压越限问题。

## 5 结语

本文针对分布式光伏接入配电网造成的功率波动和电压越限问题,考虑低压配电网量测、通信

和网络参数不完备的实际情况,提出了一种计及光伏出力不确定性的中低压配电网多时间尺度优化方法。以IEEE 33节点中压和21节点低压配电系统为例进行仿真验证,得到以下结论。

1) 所建模型考虑了配电网不同调压设备的调节时间尺度,在日前决策OLTC和CB的运行方案,在日内决策光伏和储能的有功和无功出力,可以将节点电压控制在安全范围内。

2) 所提出的日前优化模型可有效降低网络损耗,并充分发挥储能的价格套利能力。

3) 日内的上层滚动优化模型兼顾了中压配电网运行的经济性,下层模型在参数不全的低压配电网中能够应对短时间尺度下的光伏和负荷的波动,保障电网的安全运行。

下一步的研究将考虑中低压配网相间互阻抗对配电网潮流以及制定调度方案的影响。

#### 参考文献:

- [1] HAQUE M M, WOLFS P. A review of high PV penetrations in LV distribution networks: present status, impacts and mitigation measures[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2016,62:1195-1208.
- [2] 马启鹏,郝正航,张裕,等. 含高渗透率分布式光伏配电网的网络分区与电压协调控制[J]. *电网与清洁能源*,2023,39(3):93-102+108.  
MA Qipeng,HAO Zhengang,ZHANG Yu,et al.Network partition and voltage coordination control of distributed PV power distribution network with high permeability[J]. *Power System and Clean Energy*,2023,39(3):93-102+108.
- [3] 邱银锋,李国香,田浩,等. 基于ADMM的海上多平台-岸电供电系统能量-备用协同分布式优化调度[J]. *电力建设*,2023,44(1):21-29.  
QIU Yinfeng,LI Guoxiang,TIAN Hao,et al. Energy-reserve cooperative distributed optimal scheduling for offshore multi-platform and onshore power supply system based on ADMM[J]. *Electric Power Construction*,2023,44(1):21-29.
- [4] DING T,LI C,YANG Y H,et al. A two-stage robust optimization for centralized-optimal dispatch of photovoltaic inverters in active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*,2017,8(2):744-754.
- [5] WATSON J D,WATSON N R,LESTAS I. Optimized dispatch of energy storage systems in unbalanced distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*,2018,9(2):639-650.
- [6] MA W,WANG W,CHEN Z,et al. A centralized voltage regulation method for distribution networks containing high penetrations of photovoltaic power[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,2021,129:106852.
- [7] 唐巍,蔡永翔,李天锐,等. 低压配电网消纳分布式光伏的控制策略及性能分析[J]. *分布式能源*,2018,3(6):1-12.  
TANG Wei,CAI Yongxiang,LI Tianrui,et al. Distributed PV consumption control strategy and performance analysis in low voltage distribution network[J]. *Distributed Energy*,2018,3(6):1-12.
- [8] TURITSYN K,SULC P,BACKHAUS S,et al. Local control of reactive power by distributed photovoltaic generators[C]//2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg,MD,USA. IEEE,2010:79-84.
- [9] ZERAATI M,HAMEDANI GOLSHAN M E, GUERRERO J M. Distributed control of battery energy storage systems for voltage regulation in distribution networks with high PV penetration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*,2018,9(4):3582-3593.
- [10] 张江林,庄慧敏,刘俊勇,等. 分布式储能系统参与调压的主动配电网两段式电压协调控制策略[J]. *电力自动化设备*,2019,39(5):15-21+29.  
ZHANG Jianglin,ZHUANG Huimin,LIU Junyong,et al. Two-stage coordinated voltage control scheme of active distribution network with voltage support of distributed energy storage system[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2019,39(5):15-21+29.
- [11] YANG Q,BARRIA J A,GREEN T C. Communication infrastructures for distributed control of power distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*,2011,7(2):316-327.
- [12] 张克勇,王冠瑞,耿新,等. 含高比例光-储单元的主动配电网并网功率分布式协同控制策略[J]. *电力科学与技术学报*,2022,37(2):147-155.  
ZHANG Keyong,WANG Guanrui,GENG Xin,et al. Distributed cooperative control strategy for grid-connected power in ADN with high proportion of PV-ESS units[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2022,37(2):147-155.
- [13] 姚璐勤,王琦,李妍,等. 计及设备损耗成本的含光储配电网分布式电压控制策略[J]. *电力工程技术*,2023,42(6):52-63.  
YAO Luqin,WANG Qi,LI Yan,et al. Distributed voltage control strategy of distribution network with photovoltaic and energy storage considering equipment loss cost[J]. *Electric Power Engineering Technology*,2023,42(6):52-63.
- [14] WECKX S,DRIESEN J. Optimal local reactive power

- control by PV inverters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2016,7(4):1624-1633.
- [15] KARAGIANNOPOULOS S, MYLONAS C, ARISTIDOU P, et al. Active distribution grids providing voltage support: the Swiss case[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(1):268-278.
- [16] 蔡永翔,唐巍,张博,等. 适应高比例户用光伏的中低压配电网集中-分布式协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(15):4843-4854.  
CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Bo, et al. Centralized-distributed multi-objective coordinated control for MV and LV distribution networks adapting to high-proportion residential PV units[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(15):4843-4854.
- [17] VALENCIA A, HINCAPIE R A, GALLEGO R A. Optimal location, selection, and operation of battery energy storage systems and renewable distributed generation in medium-low voltage distribution networks [J]. Journal of Energy Storage,2021,34:102158.
- [18] LEISSE I, SAMUELSSON O, SVENSSON J. Coordinated voltage control in medium and low voltage distribution networks with wind power and photovoltaics [C]//2013 IEEE Grenoble Conference. Grenoble, France. IEEE,2013:1-6.
- [19] LI X Z, WANG W Q, WANG H Y, et al. Dynamic environmental economic dispatch of hybrid renewable energy systems based on tradable green certificates[J]. Energy,2020,193:116699.
- [20] 曹敏健,胡泽春,孟颖,等. 含抽蓄电站与新能源发电的柔性直流系统日前优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2021,45(15):36-44.  
CAO Minjian, HU Zechun, MENG Ying, et al. Day-ahead optimal dispatch method for flexible DC system with pumped storage hydropower plant and new energy power generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(15):36-44.
- [21] 张博,唐巍,蔡永翔,等. 基于一致性算法的户用光伏逆变器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.
- [22] STETZ T, MARTEN F, BRAUN M. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2013,4(2):534-542.
- [23] HE M Y, SOLTANI Z, GHALJEHEI M, et al. A SOCP-based ACOPF for operational scheduling of three-phase unbalanced distribution systems and coordination of PV smart inverters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024,39(1):229-244.
- [24] 郭沛,王利利,李锰,等. 基于灵敏度聚类的含DG配电网电压分区控制方法[J]. 电力科学与技术学报,2022,37 (6):100-107.  
GUO Pei, WANG Lili, LI Meng, et al. Voltage partition control method for distribution network with DG based on sensitivity clustering[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(6):100-107.
- (上接第84页 Continued from page 84)
- [18] 徐俊俊,吴在军,胡素然,等. 考虑多类型分布式电源和负荷不确定性的主动配电网区间状态估计[J]. 中国电机工程学报,2018,389(11):3255-3266.  
XU Junjun, WU Zaijun, HU Qinran, et al. Interval state estimation for active distribution networks considering uncertainties of multiple types of DGs and loads[J]. Proceedings of the CSEE,2018,389(11):3255-3266.
- [19] ISSICABA D, COSTA A S, COLOMBO J L. Real-time monitoring of points of common coupling in distribution systems through state estimation and geometric tests[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(1):9-18.
- [20] 尹冠雄,陈彬彬,孙宏斌,等. 综合能源系统分析的统一能路理论(四):天然气网动态状态估计[J]. 中国电机工程学报,2020,40(18):5827-5837.  
YIN Guanxiong, CHEN Binbin, SUN Hongbin, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (IV): dynamic state estimation of the natural gas network[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(18):5827-5837.
- [21] 龙文,黄涛,朱燕,等. 基于状态估计的配电网多源信息数据辨识[J]. 电子器件,2022,45(6):1408-1412.  
LONG Wen, HUANG Tao, ZHU Yan, et al. Multi-source information data identification in distribution network based on state estimation[J]. Chinese Journal of Electron Devices,2022,45(6):1408-1412.
- [22] ZANG H X, GENG M H, HUANG M Y, et al. Asynchronous and adaptive state estimation of integrated electricity-gas energy systems[J]. IEEE Internet of Things Journal,2023,10(9):7636-7644.
- [23] CHEN L, LI Y, HUANG M Y, et al. Robust dynamic state estimator of integrated energy systems based on natural gas partial differential equations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2022,58(13):3303-3312.
- [24] 陈远东,孟辉,包森布尔,等. 基于边缘计算的新能源电网云-边协同优化调度模型研究[J]. 可再生能源,2023, 41(3):377-383.  
CHEN Yuandong, MENG Hui, BAO Fenbuer, et al. Research on cloud-Side collaborative optimal scheduling model of new energy grid based on edge computing[J]. Renewable Energy Resources,2023,41(3):377-383.