

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240086

考虑分级重构的配电网安全低碳两阶段运行优化方法

罗龙波¹, 陈明辉¹, 王雯沁², 高红均², 刘俊勇²

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510630; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 随着配电网拓扑结构的复杂程度提高, 针对高比例可再生能源出力预测误差会导致配电网优化调度决策的准确性下降的问题, 提出考虑分级重构方法的配电网安全低碳两阶段优化方法。首先, 分析了配电网两类分级开关的影响程度和两阶段运行优化框架。其次, 提出了配电网日前-日内两阶段优化方法, 通过协调分级开关动作、储能系统、工业负荷需求响应等手段实现配电网最优化运行。然后, 考虑到光伏出力在不同时间尺度上预测误差, 分别构建了以低碳性为目标的日前全局低碳经济调度模型及以安全性为目标的日内滚动安全经济调度模型。最后, 算例验证了所提模型能够在光伏高比例渗透背景下, 有效支撑复杂配电网安全低碳运行。

关键词: 配电网; 多级重构; 低碳; 优化调度; 可再生能源

A two-stage secure and low-carbon operation optimization for a distribution network considering multi-level reconfiguration

LUO Longbo¹, CHEN Minghui¹, WANG Wenqin², GAO Hongjun², LIU Junyong²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510630, China;

2. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the increasing complexity of distribution network topology, there is a problem that a high proportion of renewable energy output prediction errors will lead to a decline in the accuracy of distribution network optimal scheduling decisions. Thus a two-stage secure and low-carbon operation optimization method considering multi-level reconfiguration is proposed. First, the influence of two kinds of multi-level switches on reconfiguration and two-stage operational framework of a distribution network are analyzed. Secondly, a day-ahead and intra-day two-stage operation optimization method is proposed to realize an optimal operation solution by coordinating the multi-level switches' state, the energy storage system and industrial load demand response. Then, the day-ahead global low-carbon economic scheduling and intra-day rolling security economic scheduling models are constructed by considering the photovoltaic output prediction errors over different time scales. Finally, numerical examples verify that the proposed model can effectively support the secure and low-carbon operation of complex distribution networks with high photovoltaic penetration.

This work is supported by the Innovation Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. 030100KK52222069).

Key words: distribution network; multi-level reconfiguration; low carbon; optimized scheduling; renewable energy

0 引言

随着配电网拓扑、馈线互联关系的复杂程度提高, 配电网的优化目标从传统的经济性向低碳性和安全性转变, 这对复杂配电网的优化手段提出了新的挑战^[1-3]。同时, 在“双高”背景下, 由于不确定性因素对配电网的调度决策影响较大, 针对可再生

能源预测与实际出力之间存在误差的问题, 配电网需要在不同时间尺度上对自身的调度手段进行合理规划, 才能在符合实际配电网运行工况条件下使自身资源得到充分并有效利用^[4]。

目前, 配电网常通过重构手段对分段开关和联络开关的组合状态进行调整, 能够改善调度周期内的网络潮流分布, 从而促进光伏消纳、提高变压器带载运行的安全性^[5-6]。文献[7]提出了基于贪婪算法的配网多阶段快速重构新方法, 提升了多阶段重构的计算效率。文献[8]建立了基于拓扑相似性的含高

基金项目: 中国南方电网有限责任公司创新项目资助 (030100KK52222069)

比例分散式风电配网重构模型, 在高比例风电接入背景下有效缓解弃风、失负荷等问题。文献[9]提出通过动态重构方法能够在保证操作次数较低的同时, 达到减少配电网有功损耗、提高节点电压稳定性的目的。然而, 在复杂配电网的背景下, 不考虑负荷分布情况就对变压器间、变电站间的联络开关状态进行频繁调节, 会增加配电网运行的安全隐患。因此, 有必要先对联络开关进行重要程度分级, 再进行分级重构, 并在优化过程中兼顾到馈线、变压器、变电站运行的安全性^[10]。现有文献针对配电网分级重构的研究大多在于日前的整体性优化中, 如文献[11]将“馈线-变压器”分级重构应用在净负荷时空分布不均衡的配电网中, 通过日前优化避免了潮流大规模转移; 文献[12]提出在配电网分级条件下进行拓扑调整、潮流修正, 更加贴合配电网实际运行工况并提升配电网韧性。然而在实际运行优化中, 不同等级的联络开关除了带载的重要程度不同, 其调度所需的预留时间也不同。重要程度高的联络开关需要预留给调度人员更多时间进行倒闸决策安排。因此, 考虑到复杂配电网的实际运行情况, 结合配电网开关分级条件, 将配电网的调度手段分为日前-日内两阶段更加具有现实意义。

除了自身的重构手段, 随着配电网负荷的多样性、灵活性资源种类的增加, 配电网也常考虑通过协调分布式能源出力^[13]、储能系统出力^[14]、可时移负荷需求响应^[15]等方式增加系统的调度韧性。在配电网“双高”背景下, 预测高比例光伏出力会在日前时间尺度、日内时间尺度以及实际出力上存在一定的误差。因此, 在配电网实际运行中, 单一的日前优化决策的准确性会有所下降。文献[16]将光伏实际上网出力纳入日内滚动优化中, 以更好地应对不确定性因素对配电网运行的影响。考虑到工业负荷的需求响应时间^[17]、储能元件的多时段时序调节作用^[18], 通过日前全局优化决策加日内滚动优化调度的方法, 可以充分调动配电网柔性资源应对可再生能源的波动, 提高配电网调控弹性和系统运行稳定性^[19]。文献[20]提出了基于网侧资源协调的自储能柔性互联配电网日前-日内优化模型, 提高了配电网的运行效益和供电质量。文献[21]提出了基于最优经济运行区域的综合能源系统日前-日内协同调度方法, 以源荷灵活性资源为纽带进行两阶段优化, 有效降低了系统运行成本和减少碳排放量。因此, 在“双碳”目标背景下, 结合配电网分级重构手段, 在日前优先通过高层级重构、调度储能和需求响应资源来降低配电网运行的碳排放量。在日内通过低层级重构、协调分布式能源出力来修正不确

定性带来的影响, 能使优化结果更加贴合复杂配电网的实际, 并在保障配电网安全低碳运行层面具有较大潜力。

基于上述研究分析, 本文开展了考虑预测误差和分级重构的配电网安全、低碳两阶段优化调度方法研究。首先, 建立了配电网分级重构框架, 分析了配电网分级重构方法以及两类分级开关动作的影响范围。在此基础上, 提出了配电网日前-日内两阶段优化方法, 通过分级开关动作、储能、工业负荷需求响应等手段实现配电网最优化运行。其次, 考虑到光伏出力在不同时间尺度上预测误差, 分别构建了以低碳性为目标的第一阶段全局优化调度模型, 以及以安全性为目标的第二阶段滚动优化调度模型。最后, 算例验证了所提模型能够在光伏高比例渗透背景下, 有效支撑复杂配电网安全可靠运行。

1 配电网分级重构与两阶段运行优化框架

1.1 配电网分级重构

在配电网实际运行过程中, 由于馈线间、变压器间以及变电站间所带负载的种类及容量不同, 联络开关的重要程度也不同。在决策不同重要程度的开关时, 不同开关的调度安排时间也会变化。因此, 本文将配电网联络开关分为两级, 其表现形式如图1所示。其中: I级联络开关主要用于不同变电站间、不同变压器间的负荷转移。此类开关动作一般会导致大范围潮流转移, 重要程度较高, 调度人员需要提前一天计划倒闸; II级联络开关主要用于同一个变压器下所带的负载在不同馈线上进行转移, 此类开关动作一般只会引起小范围局部潮流变化, 重要程度较低, 可作为临时手段来调节线路负载平衡。

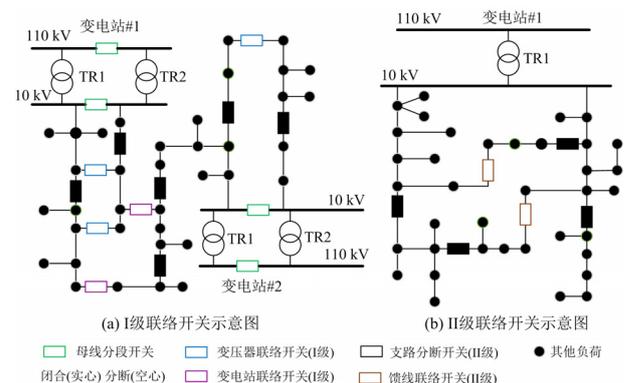


图1 配电网分级开关示意图

Fig. 1 Distribution network multi-level switch diagram

1.2 两阶段运行优化框架

考虑到配电网对自身资源、可控手段的调度响应时间, 本文提出日前-日内两阶段优化策略, 如图

2 所示。配电网日前第一阶段进行低碳经济调度,以 1 h 为单位时间尺度,对配电网 I 级联络开关动作、储能系统充放电动作以及可时移工业负荷需求响应动作方案进行决策,同时将结果作为基础数据,应用到第二阶段的日内优化中。配电网日内第二阶段进行经济安全调度,以 15 min 为单位时间尺度,基于日前的决策对配电网 II 级联络开关动作、可再生能源出力、普通负荷削减方案进行决策。最后,将第二阶段优化结果与日前第一阶段的优化结果整合,共同构成配电网日前-日内两阶段优化策略。

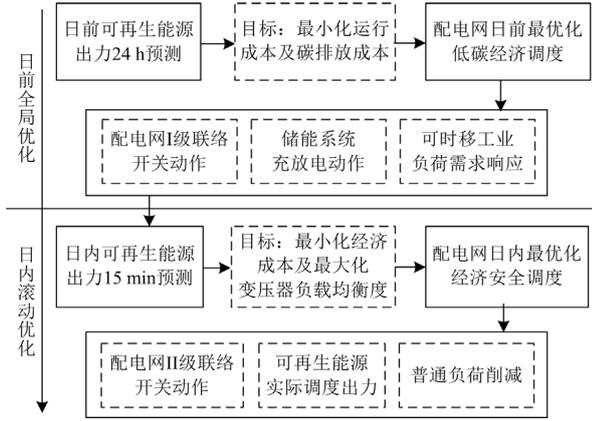


图2 配电网日前-日内两阶段优化策略

Fig. 2 Distribution network optimization strategy of day-ahead and intra-day two stages

由于分布式光伏在配电网中的渗透率越来越高,受自然环境因素的影响,光伏电站的实际出力存在不确定性,而不同时间尺度上的预测结果也会存在一定的误差。本文主要考虑的不确定因素是配电网对其所接入的光伏电站在不同时间尺度上的预测出力变化。根据配电网日前-日内两阶段优化策略,配电网在日前进行以 1 h 为单位时间尺度、24 h 为全时间尺度的光伏出力预测,预测曲线结合日前调度手段,用于配电网考虑低碳目标的全局调度决策;在日内进行以 15 min 为单位时间尺度、45 min 为阶段性全时间尺度的光伏出力预测,日内短时间的预测曲线更接近于配电网实际运行情况,结合日内调度手段,用于配电网安全目标的滚动调度决策。

2 配电网两阶段优化模型

2.1 日前低碳经济调度模型

本文建立的日前配电网优化调度方法将采用全局优化,以配电网低碳性、经济性为目标。

1) 目标函数

日前运行的优化目标以经济性、低碳性为主,低碳性目标通过变电站向上级电网购电量与碳排放

因子结合计算碳排放惩罚成本。目标主要制定预测时域内配电网线路损耗成本、切负荷成本、需求响应补偿成本、储能运维成本、碳排放惩罚成本和最小。

$$C^{\text{ahead}} = C^{\text{line,loss}} + C^{\text{LR}} + C^{\text{comp}} + C^{\text{bat}} + C^{\text{CO}_2}$$

$$\begin{cases} C^{\text{line,loss}} = c^{\text{loss}} \sum_t \sum_{ij \in E} r_{ij} l_{ij,t}, \forall t \\ C^{\text{LR}} = c^{\text{LR,pu}} \sum_t \sum_{j \in B} P_{j,t}^{\text{LR}}, \forall t \\ C^{\text{comp}} = c^{\text{comp}} \frac{1}{2} \sum_t \sum_{j \in B^{\text{DR}}} |P_{j,t}^{\text{DR}}|, \forall t \\ C^{\text{bat}} = c^{\text{bat}} \sum_t \sum_{j \in B^{\text{bat}}} (P_{j,t}^{\text{char}} + P_{j,t}^{\text{dis}}), \forall t \\ C^{\text{CO}_2} = \varphi \sum_t \sum_{j \in B^{\text{sub}}} \sum_{f \in \gamma(j)} \varepsilon^c P_{j,f,t}^{\text{trans}}, \forall t \end{cases} \quad (1)$$

式中: C^{ahead} 为日前运行总成本; $C^{\text{line,loss}}$ 、 C^{LR} 、 C^{comp} 、 C^{bat} 、 C^{CO_2} 分别为配电网运行网络损耗、失负荷、需求响应补偿、储能运维、碳排放总成本; c^{loss} 、 $c^{\text{LR,pu}}$ 、 c^{comp} 、 c^{bat} 分别为配电网网络损耗、失负荷、需求响应补偿、储能运维的单位成本; r_{ij} 、 $l_{ij,t}$ 分别为支路 ij 的电阻、支路 ij 在 t 时段电流的平方; $P_{j,t}^{\text{LR}}$ 为节点 j 在 t 时段的失负荷有功功率; $P_{j,t}^{\text{DR}}$ 为工业负荷节点 j 在 t 时段内转移的负荷量,正值表示在原本基础上削减,负值表示在原本基础上增加; $P_{j,t}^{\text{char}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{dis}}$ 分别为储能节点 j 在 t 时段内充、放电功率; $P_{j,f,t}^{\text{trans}}$ 为变电站节点 j 内变压器 f 在 t 时段的有功功率; φ 为碳排放惩罚单位成本; ε^c 为配电网向上级购电等效碳排放计量因子; E 为网络中的所有支路集合; B 为网络中的所有节点集合; B^{DR} 为网络中需求响应工业负荷节点集合; B^{bat} 为网络中含储能机组节点集合; B^{sub} 表示网络中变电站的集合; $\gamma(j)$ 表示变电站 j 中变压器的集合。

2) 潮流约束

本文拟采用交流 Distflow 模型进行潮流约束^[22],详细如式(2)一式(7)所示。

$$\sum_{k \in \alpha(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \beta(j)} (P_{ij,t} - l_{ij,t} r_{ij}) + g_j v_{j,t} = P_{j,t} \quad \forall t, j \in B \quad (2)$$

$$\sum_{k \in \alpha(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \beta(j)} (Q_{ij,t} - l_{ij,t} x_{ij}) + b_j v_{j,t} = Q_{j,t} \quad \forall t, j \in B \quad (3)$$

$$v_{j,t} = v_{i,t} - 2(P_{ij,t} r_{ij} + Q_{ij,t} x_{ij}) + l_{ij,t} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad \forall t, ij \in E - E^{\text{sw}} \quad (4)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ l_{ij,t} - v_{i,t} \end{matrix} \right\|_2 \leq l_{ij,t} + v_{i,t} \quad \forall t, ij \in E \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{j,t} = P_{j,t}^{\text{trans}} + P_{j,t}^{\text{pv}} + P_{j,t}^{\text{bat}} + P_{j,t}^{\text{DR}} - P_{j,t}^{\text{load}} + P_{j,t}^{\text{LR}} \\ Q_{j,t} = Q_{j,t}^{\text{trans}} + Q_{j,t}^{\text{pv}} + Q_{j,t}^{\text{bat}} - Q_{j,t}^{\text{load}} + Q_{j,t}^{\text{LR}} \end{cases} \quad \forall t, j \in B \quad (6)$$

$$\begin{cases} v_{j,t} = V_{j,t}^2 \quad \forall t, j \in B \\ l_{ij,t} = I_{ij,t}^2 \quad \forall t, ij \in E \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\alpha(j)$ 为以 j 为初始节点的支路终端节点集合; $\beta(j)$ 为以 j 为终端节点的支路初始节点集合; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为支路 ij 在 t 时段的有功和无功功率; $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 分别为节点 j 在 t 时段的有功和无功功率交互量; x_{ij} 、 g_j 、 b_j 分别为支路 ij 的电抗、节点 j 的电导、电纳; $V_{j,t}$ 为节点 j 在 t 时段的电压; $I_{ij,t}$ 为支路 ij 在 t 时段的电流; $v_{j,t}$ 、 $v_{i,t}$ 分别为节点 j 、 i 分别在 t 时段的电压平方值; $Q_{j,t}^{\text{trans}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{load}}$ 分别为节点 j 在 t 时段的变压器带载无功负荷、普通无功负荷; $P_{j,t}^{\text{trans}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{load}}$ 分别为节点 j 在 t 时段的变压器带载有功负荷、普通有功负荷; $Q_{j,t}^{\text{LR}}$ 为节点 j 在 t 时段的失负荷无功功率; E^{sw} 为网络中的所有开关支路集合, 包括 I 级联络开关和 II 级联络开关。

3) 安全约束

配电网节点电压约束、支路电流约束如式(8)所示。

$$\begin{cases} (V_j^{\min})^2 \leq v_{j,t} \leq (V_j^{\max})^2, \quad \forall t, \forall j \in B \\ (I_{ij}^{\min})^2 \leq l_{ij,t} \leq (I_{ij}^{\max})^2, \quad \forall t, \forall ij \in E - E^{\text{sw}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_j^{\max} 、 V_j^{\min} 分别为节点 j 处电压的上、下限; I_{ij}^{\max} 、 I_{ij}^{\min} 分别为支路 ij 处电流的上、下限。

4) 主网约束

变压器向配网注入有功、无功约束, 变压器与馈线负荷平衡约束分别如式(9)和式(10)所示。

$$\begin{cases} P_{j,f}^{\text{trans,min}} \leq P_{j,f,t}^{\text{trans}} \leq P_{j,f}^{\text{trans,max}} \\ Q_{j,f}^{\text{trans,min}} \leq Q_{j,f,t}^{\text{trans}} \leq Q_{j,f}^{\text{trans,max}} \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{sub}}, \forall f \in \gamma(j) \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{j,f,t}^{\text{trans}} = \sum_{k \in \alpha(j)} P_{jk,t} \\ Q_{j,f,t}^{\text{trans}} = \sum_{k \in \alpha(j)} Q_{jk,t} \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{sub}}, \forall f \in \gamma(j) \quad (10)$$

式中: $P_{j,f}^{\text{trans,max}}$ 、 $P_{j,f}^{\text{trans,min}}$ 和 $Q_{j,f}^{\text{trans,max}}$ 、 $Q_{j,f}^{\text{trans,min}}$ 分别为变电站节点 j 内变压器 f 向配网注入的有功和无功的上、下限。

5) 失负荷约束

配电网节点可切负荷上限约束如式(11)所示。

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{LR}} \leq P_{j,t}^{\text{load}} \quad \forall t, \forall j \quad (11)$$

6) 光伏出力约束

光伏节点向配网注入有功上限约束为

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{pv}} \leq P_{j,t}^{\text{pv}0} \quad \forall t, j \in B^{\text{pv}} \quad (12)$$

式中: $P_{j,t}^{\text{pv}0}$ 、 $P_{j,t}^{\text{pv}}$ 分别为光伏节点 j 在 t 时段的预测满发输出功率、实际上网有功功率; B^{pv} 为网络中含光伏发电机组节点集合。

7) 储能系统约束

储能系统时序性约束、蓄电池储能上/下限约束、储能充/放电功率约束、互补约束为

$$S_{j,t}^{\text{bat}} = S_{j,t-1}^{\text{bat}}(1 - \mu^{\text{loss}}) + \left(P_{j,t}^{\text{char}} \rho^{\text{char}} - \frac{P_{j,t}^{\text{dis}}}{\rho^{\text{dis}}} \right) \Delta t, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{bat}} \quad (13)$$

$$S_{j,t}^{\text{bat,min}} \leq S_{j,t}^{\text{bat}} \leq S_{j,t}^{\text{bat,max}}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{bat}} \quad (14)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{char}} \leq z_{j,t}^{\text{char}} P^{\text{char,max}} \\ 0 \leq P_{j,t}^{\text{dis}} \leq z_{j,t}^{\text{dis}} P^{\text{dis,max}} \\ 0 \leq z_{j,t}^{\text{dis}} + z_{j,t}^{\text{char}} \leq 1 \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{bat}} \quad (15)$$

式中: $S_{j,t}^{\text{bat}}$ 为电储能系统的储电量; μ^{loss} 为其自放电率; ρ^{char} 、 ρ^{dis} 分别为充、放电效率; $S_{j,t}^{\text{bat,max}}$ 、 $S_{j,t}^{\text{bat,min}}$ 分别为容量的上、下限; $P^{\text{char,max}}$ 、 $P^{\text{dis,max}}$ 分别为充、放电功率的上、下限; $z_{j,t}^{\text{char}}$ 、 $z_{j,t}^{\text{dis}}$ 分别为充、放电状态的 0-1 整数变量, 为“1”表示“是”, 为“0”表示“否”。

8) 重构约束

配电网拓扑约束、开关动作约束为

$$\begin{cases} \sum_{ij \in E - E^{\text{sw}}} 1 + \sum_{ij \in E^{\text{sw}}} w_{ij,t} = N^{\text{bus}} - N^{\text{sub}} \quad \forall t \\ \delta_{ij,t}^{\text{sw,de}} + \delta_{ij,t}^{\text{sw,in}} \leq 1 \quad \forall t, ij \in E^{\text{sw}} \\ w_{ij,t} - w_{ij,t-1} = \delta_{ij,t}^{\text{sw,in}} - \delta_{ij,t}^{\text{sw,de}} \quad \forall t, ij \in E^{\text{sw}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $w_{ij,t}$ 为支路 ij 在 t 时段的开关状态, 若其为 1 则说明支路 ij 的开关关闭; N^{bus} 、 N^{sub} 分别为节点数量和变电站数量; $\delta_{ij,t}^{\text{sw,in}}$ 、 $\delta_{ij,t}^{\text{sw,de}}$ 均为开关分支 ij 在 t 时段运行状态变化的二进制变量, $\delta_{ij,t}^{\text{sw,in}}$ 为 1 表示由断开状态变为闭合状态、为 0 表示其他状态, $\delta_{ij,t}^{\text{sw,de}}$ 为 1 则表示由闭合状态变为断开状态、为 0 表示其他状态。

含有分布式电源的配电网在式(16)约束下仍可能出现孤岛运行的情况。因此, 在非变电站节点注入较小的节点注入功率 ε , 通过简化的潮流约束式(17)来保证非变电站节点和变电站节点的连通性^[23]。

$$\begin{cases} \sum_{k \in \alpha(j)} P_{jk,t}^* - \sum_{i \in \beta(j)} P_{ij,t}^* = P_{j,t}^* = \varepsilon \quad \forall t, j \in B \\ -w_{ij,t} P_{ij,t}^{\max} \leq P_{ij,t}^* \leq w_{ij,t} P_{ij,t}^{\max} \quad \forall t, ij \in E^{\text{sw}} \\ -P_{ij,t}^{\max} \leq P_{ij,t}^* \leq P_{ij,t}^{\max} \quad \forall t, ij \in E - E^{\text{sw}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{ij,t}^*$ 表示支路 ij 上 t 时段的辅助潮流有功功率而非实际传输有功功率; $P_{j,t}^*$ 表示非变电站节点 j 在 t 时段注入辅助潮流有功功率而非实际有功功率; $P_{ij,t}^{\max}$ 表示支路 ij 上 t 时段的潮流有功功率上限。

9) 工业负荷需求响应约束

部分工业负荷可与配电网达成协议, 提前一天划定可时移负荷容量帮助配电网削峰填谷, 但配电网需要就转移负荷量给予工业侧一定的响应补偿。需求响应负荷量满足 24 h 内总体平衡约束如式(18)所示。

$$\begin{cases} -P_{j,t}^{\text{load}} \leq P_{j,t}^{\text{DR}} \leq P_{j,t}^{\text{load}} \\ \sum_t P_{j,t}^{\text{DR}} = 0 \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{DR}} \quad (18)$$

2.2 日内安全经济调度模型

本文建立的日内配电网安全优化调度方法将采用模型预测控制算法^[24-25](model predictive control, MPC), 它能根据每次优化过程中系统反馈的最新状态实时更新决策命令, 更加符合实际情况下配电网的运行需求。本文日内安全经济调度包含两方面的目标函数, 通过归一加权整合为一个目标并进行求解。

1) 安全性目标函数

日内考虑到实际运行中同一个变电站不同变压器带载的差异性, 为实现变压器负荷合理分配, 设置最小化变压器负载均衡指标为目标函数, 具体表示如式(19)一式(21)所示。

$$B^{\text{trans}} = \sum_t B_t^{\text{trans}} \quad (19)$$

$$\begin{cases} B_t^{\text{trans}} = \sum_j B_{j,t}^{\text{trans}} / N^{\text{sub}}, \quad \forall t \\ B_{j,t}^{\text{trans}} = \|R_{j,f,t}^{\text{trans}} - R_{j,t}^{\text{trans,av}}\|_2, \quad \forall j \in B^{\text{sub}} \\ R_{j,f,t}^{\text{trans}} = P_{j,f,t}^{\text{trans}} / P_{j,f}^{\text{trans,max}}, \quad \forall f \in \gamma(j) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} R_{j,t}^{\text{trans,av}} = (\sum_f R_{j,f,t}^{\text{trans}}) / N_j^{\text{trans}}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{sub}} \\ P_{j,f,t}^{\text{trans}} = \sum_{k \in \alpha(j,f)} P_{jk,t}, \quad \forall f \in \gamma(j) \end{cases} \quad (21)$$

式中: B^{trans} 为变压器负载均衡指标目标函数; B_t^{trans} 为 t 时段变压器负载均衡指标; $R_{j,f,t}^{\text{trans}}$ 、 $B_{j,t}^{\text{trans}}$ 分别为变电站节点 j 在 t 时段处的负载率、变压器负载平衡指数; $R_{j,t}^{\text{trans,av}}$ 为变电站节点 j 在 t 时段的负载率平

均值; N^{sub} 为变电站总数; N_j^{trans} 为连接到变电站节点 j 处的变压器数量; $\alpha(j,f)$ 为变电站节点 j 内变压器 f 下游的馈线组。

变压器负载平衡指数表示所有变电站变压器负荷的均方误差, 均方误差表达式是非线性方程, 可以转化为具有小松弛间隙的二阶锥表达式, 如式(22)所示。

$$\|R_{j,f,t}^{\text{trans}} - R_{j,t}^{\text{trans,av}}\|_2 \leq B_{j,t}^{\text{trans}} \quad (22)$$

2) 经济性目标函数

日内以安全性优化为主, 经济性保障为辅, 设置经济性指标, 使线路损耗、失负荷、弃光量成本最小化。

$$\begin{cases} C^{\text{intra}} = C^{\text{line loss}} + C^{\text{LR}} + C^{\text{pvcut}} \\ C^{\text{line loss}} = c^{\text{loss}} \sum_t \sum_{ij \in E} r_{ij} l_{ij,t} \\ C^{\text{LR}} = c^{\text{LR,pu}} \sum_t \sum_{j \in B} P_{j,t}^{\text{LR}}, \quad \forall t \\ C^{\text{pvcut}} = c^{\text{pvcut}} \sum_t \sum_{j \in B^{\text{pv}}} (P_{j,t}^{\text{pv0}} - P_{j,t}^{\text{pv}}) \end{cases} \quad (23)$$

式中: C^{intra} 为日内运行总成本; C^{pvcut} 为配电网运行弃光总成本; c^{pvcut} 为配电网弃光单位成本。

3) 重构约束

配电网拓扑约束、II 级开关动作约束如式(24)所示。

$$\begin{cases} \sum_{ij \in E - E^{\text{swII}}} 1 + \sum_{ij \in E^{\text{swII}}} w_{ij,t} = N^{\text{bus}} - N^{\text{sub}} \\ \delta_{ij,t}^{\text{sw,de}} + \delta_{ij,t}^{\text{sw,in}} \leq 1 \quad \forall t, ij \in E^{\text{swII}} \\ w_{ij,t} - w_{ij,t-1} = \delta_{ij,t}^{\text{sw,in}} - \delta_{ij,t}^{\text{sw,de}} \end{cases} \quad (24)$$

式中, E^{swII} 为网络中的所有 II 级联络开关支路集合。

4) 潮流约束、安全约束、主网约束、失负荷约束、光伏约束见 2.1 节。

2.3 求解流程

第二阶段经济低碳调度模型采用 MPC 滚动优化, 仿真时长 T_{final} 设置为 24 h、预测时域为 0.75 h、控制时域与采样时域均为 0.25 h。MPC 滚动优化运行模块如图 3 所示。

横轴为采样时间轴, T_p 对应预测时域, T_c 对应控制时域, 且 $T_p \geq T_c$ 。在 t 时段, 利用时段的预测数据联合优化, 得到控制时域内配电网 II 级联络开关的动作方案、光伏实际上网量与普通负荷削减情况。执行第一个控制决策, 同时将时间轴向前推进, 反复滚动优化。

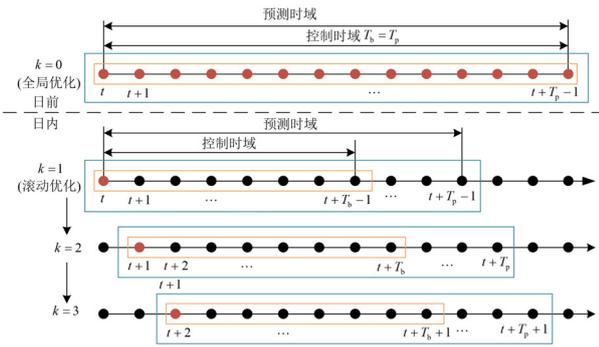


图3 两阶段优化示意图

Fig. 3 Distribution network optimization strategy of day-ahead and intra-day

根据 2.1 节所建立的第一阶段日前安全调度混合整数二阶锥规划模型, 可采用 CPLEX 求解器进行直接求解。因此考虑分级重构的配电网两阶段优化流程如图 4 所示。

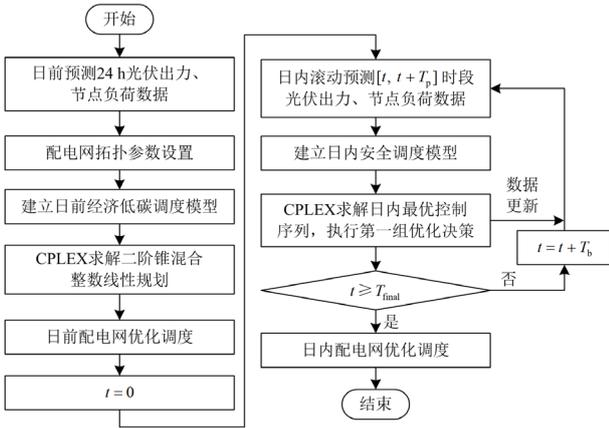


图4 求解流程

Fig. 4 Solving step

3 算例分析

3.1 数据设置

本文拟定采用修改后的实际 148 节点系统作为算例对象, 其拓扑结构如图 5 所示, 负荷数据参考文献[26]。配电网开关配置信息如表 1 所示。配电网节点配置信息如表 2 所示。

案例设置如下所述。

Case0 (对照案例): 不考虑优化方法。

Case1: 只考虑第一阶段日前全局优化方法。

Case2: 只考虑第二阶段日内滚动优化方法。

Case3: 本文提出的两阶段日前-日内优化方法。

Case4: 在预测误差增大的条件下, 使用 Case1 背景下的日前优化决策结果。

Case5: 在预测误差增大的条件下, 只考虑第二

阶段日内滚动优化方法。

Case6: 在预测误差增大的条件下, 考虑本文提出的两阶段日前-日内优化方法。

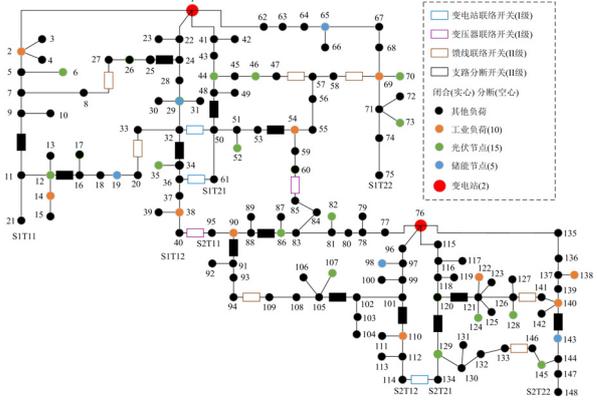


图5 148节点系统

Fig. 5 148-bus system

表1 配电网开关配置信息

Table 1 Distribution network switch configuration information

开关类型	开关编号
I 级	32-50,36-61,114-134,40-95,60-85
II 级	8-27,9-11,12-16,20-33,24-25,32-34,47-57,48-50, 53-54,58-69,86-88,90-91,94,109,101-110,102-105, 120-121,120-129,126-141,133-146,140-143

表2 配电网节点配置信息

Table 2 Distribution network node configuration information

节点类型	节点编号
光伏节点	6,12, 35,44,46,52,70,73,82,86,124,128,129,107,145
储能节点	19,29, 65,98, 143
工业负荷节点	2,14,38,54,69,90,110,122,138,140

本文所采用的节点系统覆盖区域范围有限, 将该区域内的光照强度视作同一变化趋势, 不同光伏节点的装机容量一致, 光伏预测出力曲线参考文献[26], 则光伏节点的预测出力曲线保持同一变化趋势。典型光伏节点#12 的日前-日内光伏出力预测如图 6 所示。

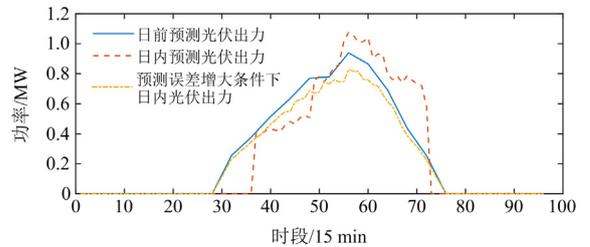


图6 #12 典型光伏节点日前-日内光伏出力预测

Fig. 6 Prediction of day-ahead and intra-day PV output of #12 typical PV node

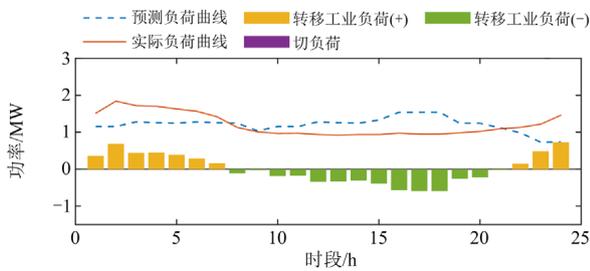
3.2 第一阶段优化结果分析

第一阶段中，配电网对 I 级开关、储能系统、需求响应工业负荷转移进行日前决策。3 类案例下配电网优化结果如表 3 所示。其中，典型工业负荷节点(#122)与储能节点优化结果如图 7 所示。

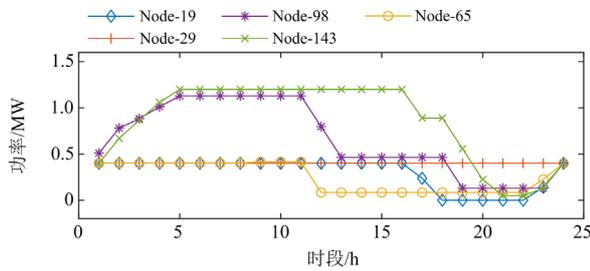
表 3 配电网优化结果

Table 3 Optimization results of distribution network

项目	Case0	Case1	Case2	Case3
变压器负载均衡	12.8	4.19	10.5	3.72
光伏消纳率/%	99.9	98.72	45.5	83.40
储能成本/元	0	145	0	145
需求响应成本/元	0	2749	0	2749
切负荷成本/元	9655	8555	0	3639
线路损耗成本/元	5688	4861	3442	3900
碳排放成本/元	3838	3400	3495	3478



(a) Case1-Node-122



(b) Case1-储能蓄电池

图 7 典型工业负荷节点与储能节点优化结果

Fig. 7 Optimization results of typical industrial load node and storage system nodes

Case1 中，配电网进行日前决策，具有时移特性的工业负荷、储能系统会协助配电网进行负荷转移，改变实际负荷曲线。虽然增加了储能成本及需求响应成本，但潮流转移会减少配电网的切负荷和线路损耗，较对照案例分别降低 11.4%、14.5%。由此可见，配电网日前优化主要通过重构改变拓扑、降低网络损耗，从而降低购电量，进而降低碳惩罚成本。储能和工业负荷需求响应协助消纳光伏、减少线路超载而引起的切负荷。

3.3 第二阶段优化结果分析

基于第一阶段的决策结果，配电网对 II 级开关、

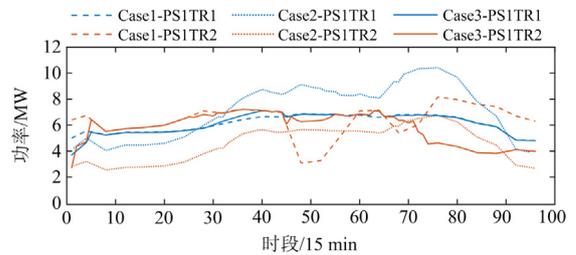
光伏实际出力以及切负荷进行日内决策。Case2 与 Case3 配电网开关动作情况如表 4 所示。Case1—Case3 中变压器负载变化曲线如图 8 所示，图中：PS1 为#1 变电站节点；PS2 为#76 变电站节点；TR1 和 TR2 分别为对应变电站内的两台不同变压器。

表 4 Case2 和 Case3 开关动作优化结果

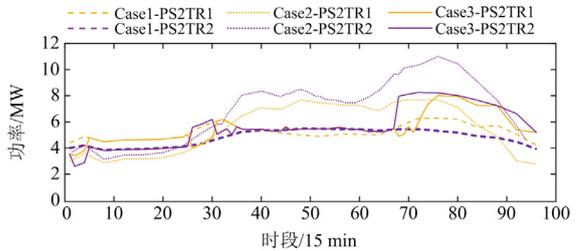
Table 4 Optimization results of switch states in Case2 and Case 3

Case2		
时间/min	开关断开	开关闭合
0	12-16;102-105	20-33;94-109
660	120-129	133-146
690	94-109	102-105
945	102-105	94-109

Case3		
时间/min	开关断开	开关闭合
0	12-16;32-34;86-88;102-105;120-129;140-143	20-33;94-109;133-146; 36-61;114-134;40-95
375	90-91;133-146	102-105;140-143
450	102-105;140-143	90-91;133-146
480	53-54	47-57
660	94-109	102-105
1005	133-146	140-143
1095	48-50	86-88
1230	90-91	94-109
1320	94-109	90-91



(a) #1 变电站变压器带载曲线



(b) #2 变电站变压器带载曲线

图 8 变压器负载变化

Fig. 8 Transformer load variation in different substations

结合表 3 的结果，由于 Case2 只考虑第二阶段日内滚动优化方法，其不存在储能和需求响应成本，

但实际光伏消纳率、变压器负载均衡度与 Case1 的优化结果相比均较差。可见配电网的临时调控手段不能较好地满足其安全运行需要。表 4 中, 配电网在优化周期中 II 级开关断开动作共 10 次、闭合动作共 10 次, 而如图 8 所示, 两个变电站中变压器带载的区别仍然较大。因此, 单一的日内滚动优化具有一定的局限性。

Case3 中, 变压器负载平衡度较 Case1 和 Case2 分别优化了 11.2%、64.5%, 较对照案例 Case0 优化了 70.9%。由图 8 可见, 两个变电站中的两条变压器带载曲线, Case3 的较 Case1 更加接近。由于在 Case1 的基础上再次进行日内安全性的决策修正, Case3 的优化结果可以平衡变压器带载, 避免同一个变电站中两台变压器一边重载一边轻载的情况, 降低变压器运行的安全隐患, 也能一定程度上保障配电网运行的经济性。

综上所述, 如果只考虑第二阶段日内滚动优化方案, I 级开关、储能系统及工业负荷需求响应的作用未纳入优化决策, 会导致配电网资源调度灵活性下降、优化韧性不足。虽然日内优化可以更加贴合实际运行工况, 但由于没有可时移性负荷及储能系统, 会产生大量的弃光成本, II 级开关的调整不能达到最优的变压器带载平衡状态, 从而提高因线路超负荷运行造成的切负荷成本。因此, 日前-日内的两阶段优化可以更好地调动配电网的灵活性资源, 在保证配电网低碳运行的基础上, 更大程度地保障安全。

3.4 预测误差增大条件下的优化结果分析

为了验证本文提出的多级重构的配电网安全低碳优化调度方法在不同程度可再生能源预测误差的条件下仍然适用, 本节在 Case1 的日前调度决策基础上, 拟增大日前-日内预测的误差范围并进行优化, 在预测误差增大条件下配电网优化结果如表 5 所示, 典型光伏节点(#86)中光伏出力的消纳情况如图 9 所示。

由于日内的光伏波动较日前预测结果偏差较大, 导致日前的配电网最优调度决策准确性下降。结合表 3 和表 5 可知, Case4 的光伏消纳率较 Case1 下降了 14.2%, 同时变压器负载均衡上升了 7.9%。而如果及时进行日内滚动优化, Case6 的优化结果较 Case4 会有明显的提升, 变压器负载均衡虽然不如 Case3 的优化结果, 但比 Case4 仍然下降了 8.8%, 同时切负荷、线路损耗成本分别下降了 66.4%、20.6%。Case5 和 Case2 的优化结果保持相同趋势。因此, 在可再生能源渗透率较高的背景下, 光伏出

力的日前-日内预测误差不可避免, 但本文所提出的考虑多级重构的两阶段优化可以提高配电网运行的安全性和低碳性。

表 5 预测误差增大条件下配电网优化结果

Table 5 Optimization results of distribution network with increasing prediction error

项目	Case4	Case5	Case6
变压器负载均衡	4.52	10.6	4.12
光伏消纳率/%	84.7	42.3	75.1
储能成本/元	145	0	133
需求响应成本/元	2749	0	2621
切负荷成本/元	8392	0	2822
线路损耗成本/元	4867	3477	3866
碳排放成本/元	3423	3538	3506

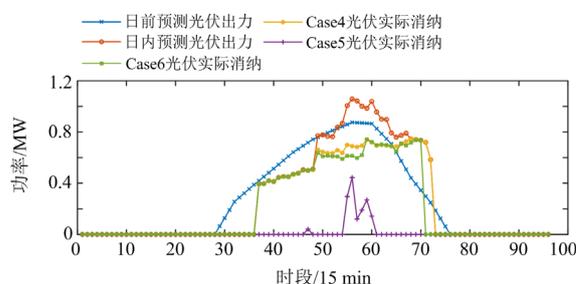


图 9 #86 光伏节点优化结果

Fig. 9 Optimization results of typical #86 PV nodes

4 结论

本文提出了考虑分级重构的配电网安全低碳两阶段运行优化调度方法, 得出以下结论:

1) 从现实角度出发, 采用配电网分级重构与日前-日内两阶段相结合的决策方法, 将储能、工业负荷需求响应等灵活性手段考虑进日前时间尺度, 光伏出力、切负荷考虑进日内时间尺度, 不仅可以减少变压器间、变电站间不必要的潮流大幅转移, 提高配电网安全可靠, 还可以使自身资源得到充分并有效利用;

2) 建立以低碳性为目标的全局日前调度、以安全性为目标的日内滚动调度, 形成两阶段优化方法, 可以降低因可再生能源的预测误差导致的配电网运行决策的不准确程度。在不同预测误差程度条件下, 日内的优化决策方案均可以对日前决策进行较好地修正, 保证配电网实际运行的可靠性, 符合复杂配电网安全、绿色的发展趋势。

参考文献

[1] 岳园园, 王主丁, 王辉, 等. 考虑设备调节成本的主动配电网日前优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 136-142.

- YUE Yuanyuan, WANG Zhuding, WANG Hui, et al. Day-ahead optimal dispatch for active distribution network considering action cost of devices[J]. *Electric Power*, 2023, 56(8): 136-142.
- [2] 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.
- [3] 戎士敏, 王聪, 贺春光, 等. 基于城市能源互联网的配电网规划优化研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(5): 66-72.
- RONG Shimin, WANG Cong, HE Chunguang, et al. Research on distribution network planning optimization based on urban energy internet[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(5): 66-72.
- [4] 胡凯强, 蔡泽祥, 蔡煜, 等. 考虑虚拟化时延的配电网保护控制微服务调度模型与优化[J/OL]. *上海交通大学学报*: 1-18[2024-01-02]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.540>.
- HU Kaiqiang, CAI Zexiang, CAI Yu, et al. Micro-service scheduling model and optimization for protection and control service of distribution network considering the virtualization delay[J/OL]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*: 1-18[2024-01-02]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.540>.
- [5] HOSSEIN H, ZENG Bo. Distribution system reconfiguration under uncertain load and renewable generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(4): 2666-2675.
- [6] FANG Xiaolun, YANG Qiang, YAN Wenjun. Power generation maximization of distributed photovoltaic systems using dynamic topology reconfiguration[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(3): 508-522.
- [7] 赵胜举, 么莉, 林济铿, 等. 基于贪婪算法的配网多阶段快速重构新方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(6): 33-41.
- ZHAO Shengju, YAO Li, LIN Jikeng, et al. Fast multi-stage reconfiguration method for distribution system based on greedy algorithm[J]. *Electric Power*, 2022, 55(6): 33-41.
- [8] 张泽坤, 杨洁, 刘念. 计及拓扑相似性的含分散式风电配网双层优化重构方法[J/OL]. *电网技术*: 1-12[2024-02-02]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0843>.
- ZHANG Zekun, YANG Jie, LIU Nian. A bi-level topology similarity-based optimal reconfiguration method for distribution[J/OL]. *Power System Technology*: 1-12[2024-02-02]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0843>.
- [9] 杨胡萍, 李晓馨, 曹正东, 等. 考虑风光的两阶段配电网动态重构方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(21): 12-21.
- YANG Huping, LI Xiaoxin, CAO Zhengdong, et al. A two-stage dynamic reconfiguration method for distribution networks considering wind and solar power[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(21): 12-21.
- [10] 王子晗, 高红均, 高艺文, 等. 基于深度强化学习的城市配电网多级动态重构优化运行方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 60-70.
- WANG Zihan, GAO Hongjun, GAO Yiwen, et al. Multi-level dynamic reconfiguration and operation optimization method for an urban distribution network based on deep reinforcement learning[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 60-70.
- [11] 马望, 高红均, 杨艳红, 等. 融入重构级别快速识别的配电网两阶段优化运行[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(14): 5154-5169.
- MA Wang, GAO Hongjun, YANG Yanhong, et al. Two-stage optimal operation for distribution network based on fast identification of reconfiguration level[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5154-5169.
- [12] 王振浩, 罗剑潇, 成龙, 等. 面向台风天气下主动配电网韧性提升的改进分级减载策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 34-48.
- WANG Zhenhao, LUO Jianxiao, CHENG Long, et al. Improved graded load reduction strategy for resilience enhancement of an active distribution network in a typhoon[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 34-48.
- [13] 叶志亮, 黎灿兵, 张勇军, 等. 含高比例气象敏感可再生能源电网日前调度时间颗粒度优化[J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57(7): 781-790.
- YE Zhiliang, LI Canbing, ZHANG Yongjun, et al. Optimization of day-ahead dispatch time resolution in power system with a high proportion of climate-sensitive renewable energy sources[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2023, 57(7): 781-790.
- [14] 王秀茹, 刘刚, 黄华峰, 等. 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, et al. 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.
- [15] 黄立滨, 蔡海青, 顾浩瀚, 等. 计及分布式光伏和储能主动支撑的配电网日前日内协调优化运行策略[J/OL]. *南方电网技术*: 1-10[2024-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20231013.0948.004.html>.
- HUANG Libin, CAI Haiqing, GU Haohan, et al.

- Coordinated optimal strategy of day-ahead and intra-day operation of distribution network considering the active support of distributed photovoltaic and energy storage system[J/OL]. *Southern Power System Technology*: 1-10[2024-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20231-013.0948.004.html>.
- [16] 赵晶晶, 朱炯达, 李振坤, 等. 考虑灵活性供需鲁棒平衡的两阶段配电网日内分布式优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(16): 61-71.
ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LI Zhenkun, et al. Two-stage intraday distributed optimal dispatch for distribution network considering robust balance between flexibility supply and demand[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(16): 61-71.
- [17] 马丽, 李伟, 裴玮, 等. 含高比例光伏配电网中计及需求侧响应的混合储能配置优化[J/OL]. *高电压技术*: 1-9[2024-04-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230593>.
MA Li, LI Wei, PEI Wei, et al. Hybrid energy storage configuration optimization in distribution network with high-proportion PV considering demand response[J/OL]. *High Voltage Engineering*: 1-9[2024-04-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230593>.
- [18] 段乃欣, 吕金历, 张小奇, 等. 基于时序模型的储能功率时长评估方法[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(12): 425-432.
DUAN Naixin, LÜ Jinli, ZHANG Xiaoqi, et al. Evaluation method of energy storage power duration based on time series model[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(12): 425-432.
- [19] 李振坤, 黄滢, 李谅, 等. 计及需求侧响应的主动配电网多时间尺度优化调度[J]. *电力建设*, 2023, 44(3): 36-48.
LI Zhenkun, HUANG Ying, LI Liang, et al. Multi-time scale optimal dispatching of active distribution network considering demand-side response[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(3): 36-48.
- [20] 李勇, 凌锋, 乔学博, 等. 基于网侧资源协调的自储能柔性互联配电系统日前-日内优化[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(3): 758-773, 923.
LI Yong, LING Feng, QIAO Xuebo, et al. Day-ahead and intra-day optimization of flexible interconnected distribution system with self-energy storage based on the grid-side resource coordination[J]. *Transactions of China Electrical Society*, 2024, 39(3): 758-773, 923.
- [21] 胡福年, 周小博, 张彭成, 等. 计及源荷协调的综合能源系统日前-日内两阶段低碳经济优化调度[J/OL]. *控制工程*: 1-13[2024-03-19]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230410>.
HU Funian, ZHOU Xiaobo, ZHANG Pengcheng, et al. Two-stage low-carbon economic optimization scheduling of integrated energy system with coordinated source and load[J/OL]. *Control Engineering of China*: 1-13[2024-03-19]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230410>.
- [22] GAO Hongjun, WANG Lingfeng, LIU Junyong, et al. Integrated day-ahead scheduling considering active management in future smart distribution system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6049-6061.
- [23] GAO Hongjun, MA Wang, XIANG Yimeng, et al. Multi-objective dynamic reconfiguration for urban distribution network considering multi-level switching modes[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2022, 10(5): 1241-1255.
- [24] 孙佳航, 王小华, 黄景光, 等. 基于 MPC-VSG 的孤岛微电网频率和电压动态稳定控制策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(6): 51-60, 81.
SUN Jiahang, WANG Xiaohua, HUANG Jingguang, et al. MPC-VSG based control strategy for dynamic stability of frequency and voltage in islanded microgrid[J]. *Electric Power*, 2023, 56(6): 51-60, 81.
- [25] 严潇, 程杉, 左先旺, 等. 基于目标优选和模型预测控制的风储优化策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1): 1-10.
YAN Xiao, CHENG Shan, ZUO Xianwang, et al. Optimally selected objective and model predictive control based optimal strategy of wind power with energy storage[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 1-10.
- [26] 王雯沁, 高红均, 王仁浚, 等. 考虑分布式电源支撑与农业设施协调的配电网分布鲁棒优化[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(21): 89-98.
WANG Wenqin, GAO Hongjun, WANG Renjun, et al. Distributionally robust optimization of distribution network considering distributed generator support and agricultural facility coordination[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(21): 89-98.

收稿日期: 2024-01-18; 修回日期: 2024-05-08

作者简介:

罗龙波(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力调度控制运行分析和管理工作; E-mail: 104267600@qq.com

陈明辉(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力调度控制运行分析和管理工作。E-mail: chenminghui1985@qq.com

(编辑 张颖)