

自储能柔性互联配电网多时间尺度无功功率优化方法

贺继锋¹, 张焱哲², 张涛³, 莫石², 卢子敬¹, 王俊琪²

(1. 国网湖北省电力有限公司, 武汉 430077; 2. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 武汉 430077; 3. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘要: 分布式电源的广泛接入影响了系统潮流分布, 可通过无功功率优化维持电压稳定, 提高系统运行经济性。针对传统无功功率设备调控能力不足的问题通过引入自储能智能软开关(soft open point with energy storage, E-SOP)改善了配电网的无功功率电压优化性能。日前阶段构建了长时间尺度无功功率优化模型, 确定了有载调压变压器、可投切电容器、储能装置的调度策略; 日内阶段基于源荷短期预测结果建立滚动优化模型对日前优化结果进行了修正。提出的柔性配电网多时间尺度无功功率优化方法考虑了 E-SOP 损耗特性的建模精确性, 实现了连续和离散无功功率资源的协调优化, 降低运行成本的同时减小了电压偏差。基于凸松弛技术将上述无功功率优化模型转化为混合整数二阶锥规划问题, 进而引入基于诱导目标函数(inducing objective function, IOF)的加速技术进一步提高了无功功率优化模型的计算效率。以改造后的 IEEE 33 节点系统为例进行分析, 结果验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 自储能智能软开关; 柔性配电网; 无功功率优化; 多时间尺度优化; 加速求解

Multi-Time Scale Reactive Power Optimization Method for Flexible Interconnected Distribution Networks with Self-Energy Storage

HE Jifeng¹, ZHANG Yanzhe², ZHANG Tao³, MO Shi², LU Zijing¹, WANG Junqi²

(1. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. Economics and Technology Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The widespread integration of distributed power sources affects the power flow distribution of the system. Reactive power optimization can maintain voltage stability and improve operational economy. To address the insufficient regulation capability of traditional reactive power devices, the introduction of a soft open point with self-energy storage (E-SOP) enhances the reactive power-voltage optimization performance of distribution networks. In the day-ahead stage, a long-term reactive power optimization model is developed to determine the scheduling strategies for on-load tap-changing transformers, switchable capacitors, and energy storage devices. In the day-to-day stage, a rolling optimization model based on short-term source-load forecasts is established to refine the day-ahead optimization results. The proposed multi-time scale reactive power optimization method for flexible distribution networks considers the modeling accuracy of E-SOP loss characteristics, achieving coordinated optimization of continuous and discrete reactive power resources while reducing operational costs and voltage deviations. Based on convex relaxation techniques, the aforementioned reactive power optimization model is transformed into a mixed-integer second-order cone programming problem, and an accelerated technique based on an induced objective function (IOF) is further introduced to enhance the computational efficiency of the reactive power optimization model. The IEEE 33-node system after retrofitting is used as an example for analysis, and the results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: soft open point with self-energy storage; flexible distribution networks; reactive power optimization; multi-time scale optimization; accelerated solution

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52507087);安徽省高校协同创新项目(GXXT-2023-030)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52507087); the Collaborative Innovation Program for Universities in Anhui Province (GXXT-2023-030).

0 引言

随着分布式电源(distributed generator, DG)的广泛接入,配电网的运行复杂性日益凸显,容易出现电压越限、潮流反向等问题^[1]。与此同时配电网无功功率电压调节手段也变得更加丰富,通过灵活调节能力可以有效改善系统运行性能^[2]。鉴于此,配电网无功功率电压优化引起了科研人员的广泛关注^[3-4],并能够在更大范围内实现无功功率资源的协调运行与综合利用,对于提升系统电能质量、运行效率以及提高配电网的经济性具有重要意义^[5]

传统电压和无功功率资源控制(voltage and var control, VVC)主要通过有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)、可投切电容器组(capacitor banks, CB)和联络开关(tie switches, TS)等调节设备的协调控制来实现^[6]。传统变压器分接头和无功功率补偿设备的调整采用离散控制方式,调节能力有限且精度不足^[7];基于联络开关的网络重构则受限于响应速度慢、动作次数有限等问题难以满足源荷频繁波动时配电网快速、精确优化运行的需求^[8]。近年来,随着电力电子技术的迅猛发展,配电网的电力电子化水平不断提升,逐步朝着柔性互联的方向演进,这为有效应对上述挑战提供了新机遇^[9-10]。目前以智能软开关(soft open point, SOP)^[11]为代表的新型柔性配电装备正逐渐发挥更加关键的作用,并引发了相关理论探索的研究热潮^[12]。

SOP采用全控型电力电子器件实现馈线间的常态化“柔性连接”,具备灵活、精确、快速的潮流调控能力^[13]。鉴于SOP的高昂成本,研究其与传统设备的协调优化显得尤为重要。目前,针对包含SOP的柔性配电网优化运行已相继提出优化调度^[14]、运行规划^[15]和负荷恢复^[16]模型,这些研究深入探讨了SOP在提升配电网运行性能中的支撑作用。同时,在无功功率优化领域文献[17]提出了一种含SOP的配电网电压和无功功率协调控制方法。文献[18]通过SOP与OLTC的协调优化构建了多时段优化模型,旨在抑制电压波动并提升配电网的运行经济性。为应对可再生能源的随机不确定性,文献[19-20]分别提出了配电网的实时调度和基于数据自适应的鲁棒优化方法,其中SOP与多个传统VAR设备实现了协调优化。值得注意的是,上述

柔性互联配电网无功功率电压优化研究^[17-20]虽充分发挥了SOP在空间上的有功功率/无功功率潮流调控能力,但未充分考虑储能装置在时间层面所能提供的灵活性。通常,储能装置与SOP的协调优化可为进一步提升柔性配电网无功功率优化性能提供有效手段。相较于独立配置储能和SOP,自储能型SOP(SOP with energy storage, E-SOP)不仅体积更小、成本更低,且能同时具备时空调节能力,值得深入研究^[21]。

为此,文献[22]提出了包含E-SOP的柔性配电网两阶段优化方法,旨在应对时空功率不平衡对系统运行安全带来的不利影响。文献[23]则提出了自储能柔性互联配电系统的日前-日内优化策略以实现网侧资源的协调优化。文献[24]通过对OLTC、CB、E-SOP和静止无功功率补偿器(static var compensator, SVC)的协调优化构建了自储能柔性配电网的多时间尺度电压优化模型。上述文献充分利用了E-SOP的时空灵活调控能力,其研究结果均表明采用多时间尺度优化策略能够更好地协调各类灵活性资源,从而提升配电网的运行经济性和安全性。

值得注意的是,降低损耗是无功功率电压优化问题的关键目标之一。针对柔性互联配电网的VVC问题,系统的有功功率损耗不仅涵盖配电网本身的损耗还应包括柔性互联设备的运行损耗。通常,柔性设备由电力电子器件构成,在运行过程中会产生显著的有功功率损耗^[25]。因此,在构建无功功率优化模型时绝不能忽视这一重要因素。然而,现有研究在建立柔性配电网无功功率优化问题的柔性设备稳态模型时,大多仅考虑了电力电子器件的开关损耗^[17-20, 24],这一模型显然不够全面。引入E-SOP这一更为精确的损耗模型对于提升配电网无功功率电压优化能力具有重大意义^[14],这一点值得进一步深入研究和探索。

除此之外,柔性配电网无功功率优化模型涉及非线性潮流约束、柔性设备运行约束以及离散无功功率设备引入的大量整数变量,本质上属于混合整数非线性规划(mixed-integer nonlinear programming, MINLP)问题,求解难度极高。针对这一难题,以文献[18]为代表的研究主要基于凸松弛理论将柔性配电网的无功功率优化模型转化为混合整数二阶锥规划(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)问题。随后,利用成熟的商业求解器如

CPLEX 和 MOSEK 等并通过调用分支定界法对其进行直接求解^[26]。该方法在一定程度上提升了无功功率优化模型的求解效率。然而, VVC 问题包含大量整数变量, 导致模型非凸。对于多时间尺度无功功率优化问题, 由于整数变量维度的显著增加导致分支数将急剧扩大, 这对传统求解器的直接求解方式构成了挑战^[27]。因此, 如何进一步提升无功功率优化模型的计算效率显得尤为重要。

基于上述问题, 本文提出了自储能柔性互联配电网多时间尺度无功功率优化方法。所提方法考虑了 E-SOP 的损耗特性, 构建了含 E-SOP 的配电网无功功率优化模型, 通过日前和日内两个时间尺度的优化实现了连续和离散无功功率资源的协调运行, 降低运行成本的同时可有效抑制电压偏差。通过引入二阶锥凸松弛理论将原始 MINLP 优化模型转化为 MISOCP 问题, 然后引入诱导目标函数方法 (inducing objective function, IOF), 通过诱导因子加速多时间尺度无功功率优化模型的求解效率。最后, 算例仿真验证所提方法的正确性和有效性。

1 考虑损耗特性的 E-SOP 稳态模型构建

自储能智能软开关 (E-SOP) 是基于全控型电力电子器件的柔性配电设备, 由 AC/DC 换流器 DC/DC 换流器和储能系统 (energy storage system, ESS) 组成, 如图 1 所示。

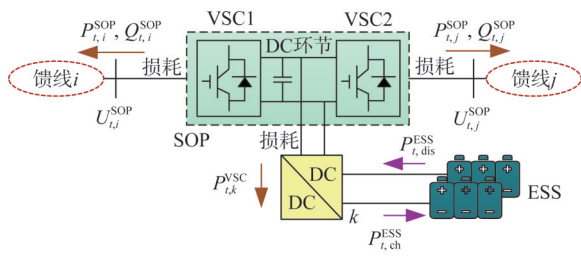


图 1 E-SOP 的拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the topology of E-SOP

E-SOP 安装于配电网中可用于取代传统联络开关, 其中两侧的 AC/DC 电压源换流器 (voltage source converter, VSC) 连接馈线 i 和 j , 中间直流链路集成 ESS。与 SOP 类似, 两侧的 VSC 通过对全控型电力电子器件实施适当的控制, 可以按照调度指令实现不同网络 and 不同馈线间有功功率的多向传输与精确控制, 并能提供无功功率补偿, 增加其运行调度“柔性”。与此同时, 与 SOP 相比, E-SOP 还具

有如下优势: 1) E-SOP 可通过存储和释放有功功率提高时间层面的功率调控灵活性; 2) E-SOP 不再要求两侧馈线的有功功率值相同, 可有效调整功率分布, 提高了空间层面的运行灵活性。充分发挥 E-SOP 的时空灵活性有助于改善配电网无功功率优化性能。

1.1 E-SOP 的损耗模型构建

由图 1 可以看出, E-SOP 由电力电子器件组成, 其产生的功率损耗不容忽视。在实际情况中 E-SOP 的运行效率与自身传输功率大小密切相关。有研究表明, 依据电磁暂态仿真结果进行曲线拟合可以得到换流器的综合损耗模型, 近似表现为端口输出功率的二次函数^[28], 如式 (1) 所示。

$$P_{\text{Conv}}^{\text{loss}} = c_0 + c_1 S + c_2 S^2 \quad (1)$$

式中: $P_{\text{Conv}}^{\text{loss}}$ 为换流器的有功功率损耗; c_0 、 c_1 、 c_2 为损耗系数; S 为换流器传输视在功率标么值。

损耗系数取决于换流器的损耗特性, 其中常数 c_0 反映了接口滤波器和变压器的空载损耗; 一次项系数 c_1 反映了电力电子元件的开关损耗; 欧姆系数 c_2 反映了电力电子元件的传导损耗。以往的 E-SOP 研究^[22-24]通常仅考虑开关损耗分量即线性项, 忽略了导通损耗分量和常数分量, 这导致结果不够精确。考虑其效率曲线以求得准确的损耗值可实现精准调控 E-SOP 的目的。

1) AC/DC 换流器损耗模型, 由式 (1) 可知, E-SOP 两侧 AC/DC 换流器的损耗模型可表示为:

$$P_{t,m}^{\text{AC,loss}} = c_{m,0} + c_{m,1} S_{t,m}^{\text{SOP}} + c_{m,2} (S_{t,m}^{\text{SOP}})^2, m \in \{i, j\} \quad (2)$$

式中: $P_{t,m}^{\text{AC,loss}}$ 为 t 时刻第 m 个 AC/DC 换流器的交流有功功率损耗; $c_{m,0}$ 、 $c_{m,1}$ 、 $c_{m,2}$ 为损耗系数; i 、 j 分别为 E-SOP 的 i 端口和 j 端口; $S_{t,m}^{\text{SOP}}$ 为其视在功率, 计算公式为:

$$S_{t,m}^{\text{SOP}} = \sqrt{(P_{t,m}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{t,m}^{\text{SOP}})^2} \quad (3)$$

式中 $P_{t,m}^{\text{SOP}}$ 、 $Q_{t,m}^{\text{SOP}}$ 分别为 t 时刻第 m 个 AC/DC 换流器的有功功率和无功功率。

2) DC/DC 换流器损耗模型, DC/DC 换流器的损耗模型为:

$$P_{t,n}^{\text{DC,loss}} = c_{n,0} + c_{n,1} |P_{t,n}^{\text{VSC}}| + c_{n,2} (P_{t,n}^{\text{VSC}})^2, n \in \{k\} \quad (4)$$

式中: $c_{n,0}$ 、 $c_{n,1}$ 、 $c_{n,2}$ 分别为 DC/DC 换流器常数项、一次项和二次项损耗系数; k 为 E-SOP 的 k 端口; $P_{t,n}^{\text{DC,loss}}$ 为第 n 个 DC/DC 换流器的直流有功功率损耗; $P_{t,n}^{\text{VSC}}$ 为其 t 时刻第 n 个 VSC 传输的有功功率。

1.2 E-SOP 的稳态潮流模型

E-SOP 在运行过程中需满足 SOP 的功率约束和所连接储能装置的运行约束。如图 1 所示, 以 E-SOP 输出的有功功率和无功功率为正方向, 其稳态潮流模型可描述如下。

1) SOP 的运行约束包括功率平衡约束、损耗约束以及容量约束, 具体如下。

$$P_{t,i}^{\text{SOP}} + P_{t,j}^{\text{SOP}} + P_{t,k}^{\text{VSC}} + P_{t,E-\text{SOP}}^{\text{Conv.loss}} = 0, \forall t \quad (5)$$

$$P_{t,E-\text{SOP}}^{\text{Conv.loss}} = P_{t,i}^{\text{AC.loss}} + P_{t,j}^{\text{AC.loss}} + P_{t,k}^{\text{DC.loss}}, \forall t \quad (6)$$

$$\underline{Q}_m^{\text{SOP}} \leq Q_{t,m}^{\text{SOP}} \leq \bar{Q}_m^{\text{SOP}}, m \in \{i, j\} \quad (7)$$

$$\sqrt{(P_{t,m}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{t,m}^{\text{SOP}})^2} \leq S_m^{\text{SOP}}, m \in \{i, j\} \quad (8)$$

式中: $P_{t,i}^{\text{SOP}}$ 和 $Q_{t,i}^{\text{SOP}}$ 分别为 t 时刻 AC/DC 换流器输出的有功功率和无功功率; $P_{t,E-\text{SOP}}^{\text{Conv.loss}}$ 为 E-SOP 的有功功率损耗; $\bar{Q}_m^{\text{SOP}}$ 和 $\underline{Q}_m^{\text{SOP}}$ 分别为 m 个 AC/DC 换流器允许输出无功功率的上下限; S_m^{SOP} 为其端口容量。

2) ESS 的运行约束包括功率平衡约束、充电模式约束以及荷电容量约束等, 具体如下。

$$P_{t,k}^{\text{VSC}} = P_{t,\text{ch}}^{\text{ESS}} - P_{t,\text{dis}}^{\text{ESS}} \quad (9)$$

$$\chi_{t,e} + \gamma_{t,e} \leq 1, \forall t, \chi_{t,e}, \gamma_{t,e} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{t,\text{dis}}^{\text{ESS}} \leq \chi_{t,e} \bar{P}_{\text{dis}}^{\text{ESS}}, \forall t \quad (11)$$

$$-\gamma_{t,e} \bar{P}_{\text{ch}}^{\text{ESS}} \leq P_{t,\text{ch}}^{\text{ESS}} \leq 0, \forall t \quad (12)$$

$$E_{t,e}^{\text{SOC}} = E_{t-1,e}^{\text{SOC}} + \frac{P_{t-1,\text{ch}}^{\text{ESS}} \rho_c - P_{t-1,\text{dis}}^{\text{ESS}} \rho_d^{-1}}{C_{\text{ESS}}}, \forall t \quad (13)$$

$$\underline{E}_e^{\text{SOC}} \leq E_{t,e}^{\text{SOC}} \leq \bar{E}_e^{\text{SOC}}, \forall t \quad (14)$$

$$E_{t,e}^{\text{SOC}}(0) = E_{t,e}^{\text{SOC}}(T) \quad (15)$$

式中: $\chi_{t,e}$ 和 $\gamma_{t,e}$ 分别为储能装置的充放电状态的两个二进制变量, 当 $\chi_{t,e} = 1$ 时表示 ESS 处于放电模式, 当 $\gamma_{t,e} = 0$ 时表示 ESS 处于充电模式, 对于 ESS, 它不能在同一时刻既运行于充电模式又运行于放电模式; $P_{t,\text{ch}}^{\text{ESS}}$ 和 $P_{t,\text{dis}}^{\text{ESS}}$ 分别为 ESS 的放电和充电功率; $\bar{P}_{\text{dis}}^{\text{ESS}}$ 为 ESS 允许的最大放电功率; $\bar{P}_{\text{ch}}^{\text{ESS}}$ 为 ESS 允许的最大充电功率; $E_{t,e}^{\text{SOC}}$ 为时刻 t 时 ESS 的荷电量; $\bar{E}_e^{\text{SOC}}$ 和 $\underline{E}_e^{\text{SOC}}$ 分别为荷电量的上下限; ρ_d 和 ρ_c 分别为 ESS 的放电和充电效率; C_{ESS} 为 ESS 的容量值; T 为优化周期。

综上, 式(2)~(15)为考虑损耗特性的 E-SOP 稳态潮流模型, 后文将其嵌入到无功功率优化模型中。

2 多时间尺度无功功率优化模型构建

柔性互联配电网无功功率优化模型需考虑不同

设备调节和响应速度的差异性以及分布式可再生能源的随机性等问题。OLTC 和 CBs 属于离散的慢动作调节设备, 投切指令不可以频繁操作; SVC 和 E-SOP 属于连续的快速调节设备, 调控和协调优化, 本文提出了自储能柔性互联配电网多时间尺度无功功率优化框架, 如图 2 所示。

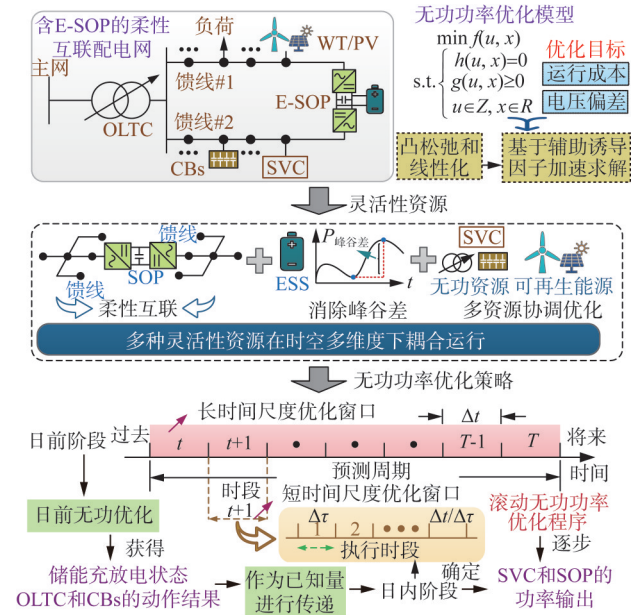


图 2 多时间尺度无功功率优化框架

Fig. 2 Framework of multi-time scale VVC

日前优化阶段基于小时级(1 h)的源荷预测数据构建了长时间尺度无功功率优化模型, 获得了 OLTC 和 CBs 的运行方案。此外, ESS 也需要调度中心预先下发充放电控制指令, 并在日前阶段交付给运行控制人员。日内优化阶段基于源荷短期预测结果以 15 min 为间隔构建短时间尺度滚动优化模型。基于日前阶段传递的优化结果确定了 SVC 和 SOP 的运行策略。所提出的无功功率优化方法实现了连续和离散资源在多时间尺度下协调优化, 降低运行成本的同时抑制了电压偏差。

2.1 日前长时间尺度无功功率优化模型

1) 目标函数

日前阶段按 1 h 时间间隔制定 OLTC、CBs 和 ESS 的调度方案。以最小化运行成本(包括网损成本 $C_{\text{loss}}^{\text{Power}}$ (配电网有功功率损耗成本和 E-SOP 运行损耗成本之和)、无功功率设备动作成本 C_{switch} 和电压偏差 f_v)为目标函数, 计算公式如下。

$$\begin{cases}
\min f = W_{\alpha} (C_{\text{loss}}^{\text{Power}} + C_{\text{switch}}) + W_{\beta} f_U \\
C_{\text{loss}}^{\text{Power}} = C_{\text{loss}} \left(\sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \Omega_b} r_{ij} I_{t,ij}^2 \Delta t + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_e} P_{t,E-SOP}^{\text{Conv.loss},i} \Delta t \right) + \\
C_{\text{loss}} \sum_{t=1}^T \left(P_{t,\text{ch}}^{\text{ESS}} (1 - \rho_c) - P_{t,\text{dis}}^{\text{ESS}} \left(1 - \frac{1}{\rho_d} \right) \right) \Delta t \\
C_{\text{switch}} = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \Omega_o} C_{\text{tap}} |K_{t,ij}^{\text{OLTC}} - K_{t-1,ij}^{\text{OLTC}}| + \\
\sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \Omega_c} C_{\text{cap}} |N_{t,i}^{\text{CB}} - N_{t-1,i}^{\text{CB}}| \\
f_U = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_n} |U_{t,i}^2 - \tilde{U}^2|, (U_{t,i} \geq \bar{U}_{\text{thr}} \| U_{t,i} \leq \underline{U}_{\text{thr}})
\end{cases} \quad (16)$$

式中: W_{α} 和 W_{β} 分别为运行成本和电压偏差的权重数, 可通过层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 获得其具体值^[29], 通常, W_{α} 取值越大对运行成本要求越高, 成本越小则电网运行经济性越好, 反之, 取值越小则电压偏差越小, 电网安全性越强; Δt 为优化步长 (1 h); Ω_b 和 Ω_n 分别为支路、节点集合, Ω_e 为 E-SOP 集合; Ω_o 和 Ω_c 分别为 OLTC、CBs 集合; C_{loss} 为有功功率损耗成本系数; C_{tap} 和 C_{cap} 分别为 OLTC 和 CBs 动作成本系数; r_{ij} 和 $I_{t,ij}$ 分别为支路 ij 的电阻和电流幅值; $U_{t,i}$ 为节点电压; $K_{t,ij}^{\text{OLTC}}$ 为 t 时刻 OLTC 的挡位值; $N_{t,i}^{\text{CB}}$ 为 t 时刻 CBs 投入的电容器数量; $\tilde{U}$ 为电压参考值。

运行成本包括配电网、E-SOP 的损耗成本和 OLTC、CBs 的动作成本。当节点电压 $U_{t,i}$ 在期望电压范围内 $[\underline{U}_{\text{thr}}, \bar{U}_{\text{thr}}]$ 时, 令 $\tilde{U} = U_{t,i}$, 则电压偏差项为 0; 当节点电压 $U_{t,i}$ 处于 $U_{t,i} \geq \bar{U}_{\text{thr}}$, 令 $\tilde{U} = \bar{U}_{\text{thr}}$; 如果 $U_{t,i} \leq \underline{U}_{\text{thr}}$, 则令 $\tilde{U} = \underline{U}_{\text{thr}}$ 。因此, 当节点电压超出期望电压范围时, 最小化 f_U 会使得各节点电压偏离期望电压范围的程度减小, 从而降低电压偏差。

2) 配电网潮流约束

$$\sum_{ji \in \Omega_b} (P_{t,ji} - r_{ji} I_{t,ji}^2) + P_{t,i}^{\text{DG}} + P_{t,i}^{\text{SOP}} - P_{t,i}^{\text{Load}} = \sum_{ik \in \Omega_b} P_{t,ik} \quad (17)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_b} (Q_{t,ji} - x_{ji} I_{t,ji}^2) + Q_{t,i}^{\text{DG}} + Q_{t,i}^{\text{SOP}} + Q_{t,i}^{\text{CB}} + Q_{t,i}^{\text{SVC}} - Q_{t,i}^{\text{Load}} = \sum_{ik \in \Omega_b} Q_{t,ik} \quad (18)$$

$$U_{t,i}^2 - U_{t,j}^2 - 2(r_{ij} P_{t,ij} + x_{ij} Q_{t,ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{t,ij}^2 = 0 \quad (19)$$

$$I_{t,ij}^2 U_{t,i}^2 = P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2 \quad (20)$$

$$(\underline{U})^2 \leq U_{t,i}^2 \leq (\bar{U})^2 \quad (21)$$

式中: $P_{t,ji}$ 和 $Q_{t,ji}$ 分别为支路 ji 有功功率和无功功率; x_{ji} 为支路 ji 电抗; $P_{t,i}^{\text{DG}}$ 和 $Q_{t,i}^{\text{DG}}$ 分别为分布式电源注入节点 i 的有功功率和无功功率; $P_{t,i}^{\text{Load}}$ 和 $Q_{t,i}^{\text{Load}}$ 分别为节点 i 的有功功率和无功功率负荷; $Q_{t,i}^{\text{CB}}$ 为可投切电容器的无功功率输出; $Q_{t,i}^{\text{SVC}}$ 为 SVC 的无功功率输出; $\bar{U}$ 和 $\underline{U}$ 分别为节点电压允许的上下限。

3) 有载调压变压器运行约束

通过有载调压变压器在配电网节点 i 和 j 的两端改变变比可调整电压, 其运行约束为:

$$U_{t,i} = (k_{ij,0} + K_{t,ij} \Delta k_{ij}) U_{t,j} \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^T |K_{t,ij} - K_{t-1,ij}| \leq \bar{\Delta}^{\text{OLTC}} \quad (23)$$

$$-\bar{K}_{ij} \leq K_{t,ij} \leq \bar{K}_{ij}, K_{t,ij} \in Z \quad (24)$$

式中: $k_{ij,0}$ 为变压器的初始变比; $K_{t,ij}$ 为其挡位数, $\bar{K}_{ij}$ 为挡位最大值; Δk_{ij} 为单位档位的变比增量; $\bar{\Delta}^{\text{OLTC}}$ 为优化时段内允许的挡位变化值; Z 为整数变量集合。

4) 无功功率补偿设备运行约束

SVC 为连续无功功率补偿设备的运行约束为:

$$\underline{Q}_i^{\text{SVC}} \leq Q_{t,i}^{\text{SVC}} \leq \bar{Q}_i^{\text{SVC}} \quad (25)$$

式中 $\bar{Q}_i^{\text{SVC}}$ 和 $\underline{Q}_i^{\text{SVC}}$ 分别为 SVC 补偿无功上下限。

CB 为离散无功功率补偿设备的运行约束为:

$$Q_{t,i}^{\text{CB}} = N_{t,i}^{\text{CB}} \cdot q_i^{\text{CB}} \quad (26)$$

$$\sum_{t=1}^T |N_{t,i}^{\text{CB}} - N_{t-1,i}^{\text{CB}}| \leq \bar{\Delta}^{\text{CB}} \quad (27)$$

$$0 \leq N_{t,i}^{\text{CB}} \leq \bar{N}_i^{\text{CB}}, N_{t,i}^{\text{CB}} \in Z \quad (28)$$

式中: $N_{t,i}^{\text{CB}}$ 为其投入电容器的数量; $\bar{N}_i^{\text{CB}}$ 为其最大值; q_i^{CB} 为单个电容器的无功功率输出; $\bar{\Delta}^{\text{CB}}$ 为优化时段内电容器允许的投切数量。

5) 分布式电源运行约束

分布式电源 PV 和 WT 基于日前预测数据, 其运行约束可表示如下。

$$P_{t,i}^{\text{DG}} = P_{t,i}^{\text{DG, re}} \quad (29)$$

$$Q_{t,i}^{\text{DG}} = P_{t,i}^{\text{DG}} \tan \theta_i^{\text{DG}} \quad (30)$$

$$\sqrt{(P_{t,i}^{\text{DG}})^2 + (Q_{t,i}^{\text{DG}})^2} \leq S_i^{\text{DG}} \quad (31)$$

式中: $P_{t,i}^{\text{DG, re}}$ 为分布式电源 i 在时刻 t 有功功率出力预测值; θ_i^{DG} 为 DG 注入节点 i 的功率因数角; S_i^{DG} 为 DG 注入节点 i 的容量。

6) E-SOP 运行约束

E-SOP 运行约束见式 (2) — (15)。

2.2 日内短时间尺度滚动优化模型

日内优化阶段负荷、PV 和 WT 的短期预测相对准确, 本文依据 1 h 的超短期预测结果, 以 15 min 为时间间隔对日前调度结果进行修正。基于超短期预测结果的持续更新数据对模型滚动优化求解, 不断向前推移时段直至优化周期($T=24$ h)结束。日内滚动优化的时段数为 4, 每次执行第一个时段的优化结果。基于日前阶段获得的 OLTC、CBs 以及 ESS 的运行调度方案传递给日内阶段, 进而构造出日内滚动优化模型。

1) 目标函数

以网络损耗和电压偏差最小为目标函数, 即:

$$\begin{cases} \min f = W_{\alpha} f_{\text{loss}} + W_{\beta} f_U \\ f_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^{T_r} \sum_{ij \in \Omega_{\text{L}}} r_{ij} I_{t,ij}^2 \Delta t' + \sum_{t=1}^{T_r} \sum_{i \in \Omega_{\text{E-SOP}}} P_{t,i,\text{E-SOP}}^{\text{Conv.Loss},i} \Delta t' \\ f_U = \sum_{t=1}^{T_r} \sum_{i \in \Omega_{\text{E}}} |U_{t,i}^2 - \bar{U}^2|, (U_{t,i} \geq \bar{U}_{\text{thr}} \| U_{t,i} \leq \underline{U}_{\text{thr}}) \end{cases} \quad (32)$$

式中: f_{loss} 为网络损耗; T_r 为短时间尺度滚动优化周期; $\Delta t'$ 为时间间隔。

2) 约束条件

日内短时间尺度滚动优化模型的约束条件包括配电网潮流约束详见式(17)–(21); SVC 运行约束详见式(25); 分布式电源约束详见式(29)–(31); E-SOP 的运行约束, 值得注意的是, E-SOP 中 ESS 的日前优化调度结果在日内阶段作为已知量, 因此, 日内阶段 E-SOP 优化变量为 SOP 两侧输出的有功功率和无功功率, 其优化模型具体为式(2)–(8)。其中, 上述日内阶段模型的约束条件涉及 OLTC、CBs 和 ESS 的相关变量, 其结果由日前阶段给定。

值得注意的是, 上述多时间尺度无功功率优化模型涉及非线性约束和离散决策变量, 导致日前优化模型属于 MINLP 问题, 日内优化模型为 NLP 问题, 亟需精确、高效的求解方法。

3 无功功率优化模型的凸松弛转换与求解

本节利用凸松弛理论对非线性约束松弛处理, 从而将日前无功功率优化模型转换为 MISOCP 问题, 将日内滚动优化模型转换为 SOCP 问题。在此基础上引入基于诱导目标函数的加速技术以提高日前整数规划问题的求解效率。

3.1 模型的凸松弛和线性化转换

1) 配电网潮流方程线性转换

通过变量替代和松弛可将非线性潮流方程转化为二阶锥形式, 该方法广泛应用于配电网优化运行领域。目标函数中的电压偏差项可引入辅助变量实现线性化。上述转换过程详见文献[17]。

2) E-SOP 模型的凸松弛处理

通过引入辅助变量 $h_{1,m}^{\text{AC}} = S_{t,m}^{\text{SOP}}$, $h_{2,m}^{\text{AC}} = (S_{t,m}^{\text{SOP}})^2$ 可将式(2)中 E-SOP 的 AC/DC 换流器的损耗模型线性化, 表达式如下。

$$P_{t,m}^{\text{AC.Loss}} = c_{m,0} + c_{m,1} h_{1,m}^{\text{AC}} + c_{m,2} h_{2,m}^{\text{AC}}, \quad m \in \{i, j\} \quad (33)$$

辅助变量需进行如下松弛处理。

$$\begin{aligned} h_{1,m}^{\text{AC}} &= \sqrt{(P_{t,m}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{t,m}^{\text{SOP}})^2} \Leftrightarrow \\ &\|P_{t,m}^{\text{SOP}} \quad Q_{t,m}^{\text{SOP}}\|_2 \leq h_{1,m}^{\text{AC}} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} h_{2,m}^{\text{AC}} &= (P_{t,m}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{t,m}^{\text{SOP}})^2 \Leftrightarrow \\ &\|2P_{t,m}^{\text{SOP}} \quad 2Q_{t,m}^{\text{SOP}} (1 - h_{2,m}^{\text{AC}})\|_2 \leq 1 + h_{2,m}^{\text{AC}} \end{aligned} \quad (35)$$

同理, 引入辅助变量 $h_{1,n}^{\text{DC}} = |P_{t,n}^{\text{VSC}}|$, $h_{2,n}^{\text{DC}} = (P_{t,n}^{\text{VSC}})^2$ 可将式(4)中 E-SOP 的 DC/DC 换流器的损耗模型线性化, 表达式如下。

$$P_{t,n}^{\text{DC.Loss}} = c_{n,0} + c_{n,1} h_{1,n}^{\text{DC}} + c_{n,2} h_{2,n}^{\text{DC}}, \quad n \in \{k\} \quad (36)$$

辅助变量 $h_{1,n}^{\text{DC}}$ 可添加如下约束对其线性化。

$$h_{1,n}^{\text{DC}} \geq P_{t,n}^{\text{VSC}}, \quad h_{1,n}^{\text{DC}} \geq -P_{t,n}^{\text{VSC}} \quad (37)$$

辅助变量 $h_{2,n}^{\text{DC}}$ 可松弛为二阶锥约束。

$$h_{2,n}^{\text{DC}} = (P_{t,n}^{\text{VSC}})^2 \Leftrightarrow \|2P_{t,n}^{\text{VSC}} (1 - h_{2,n}^{\text{DC}})\|_2 \leq 1 + h_{2,n}^{\text{DC}} \quad (38)$$

此外, E-SOP 的端口容量约束可采用文献[17]所提方法进行二阶锥松弛转换, 此处不再赘述。

3) 离散无功功率设备线性化

变压器两侧电压约束方程式(22)可通过引入辅助变量 $u_{t,ij,k}^c = u_{t,j} b_{t,ij,k}$ 对其进行线性化。

$$\begin{cases} u_{t,i} = \sum_{k=0}^{2K_{ij}} [(k_{ij,0} + (k - \bar{K}_{ij}) \Delta k_{ij})^2 u_{t,ij,k}^c] \\ (\underline{U})^2 b_{t,ij,k} \leq u_{t,ij,k}^c \leq (\bar{U})^2 b_{t,ij,k} \\ (\underline{U})^2 (1 - b_{t,ij,k}) \leq u_{t,j} - u_{t,ij,k}^c \leq (\bar{U})^2 (1 - b_{t,ij,k}) \end{cases} \quad (39)$$

其中: $b_{t,ij,k}$ 为二进制变量, 并满足:

$$\sum_{k=0}^{2K_{ij}} b_{t,ij,k} = 1, \quad b_{t,ij,k} \in \{0, 1\} \quad (40)$$

式(16)和式(23)所描述的绝对值项可引入辅助变量 $K_{t,ij}^+$ 和 $K_{t,ij}^-$, 并添加约束对其进行线性化。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T (K_{t,ij}^+ + K_{t,ij}^-) \leq \bar{\Delta}^{\text{OLTC}} \\ K_{t,ij} - K_{t-1,ij} = K_{t,ij}^+ - K_{t,ij}^- \\ K_{t,ij}^+ \geq 0, K_{t,ij}^- \geq 0 \end{cases} \quad (41)$$

对于可投切电容器引入的绝对值项也可以采用相同的方式对其进行线性化, 详见文献[19]。

3.2 多时间尺度模型的优化求解

1) 基于 IOF 的诱导加速方法

经过上述凸松弛和线性化处理, 原始非线性非凸无功功率优化模型被转化为二阶锥规划问题, 提高了模型求解可行性。值得注意的是, 对于原始日前优化模型 M0 而言, 其包含与 OLTC、CBs 等无功功率设备和 ESS 充放电模式相关的整数变量。通过模型转换后得到的 M1 属于 MISOCP 问题, 可采用 CPLEX 调用分支定界法对其进行直接求解^[17]。然而, 考虑多时间尺度的无功功率优化模型随着时间尺度的增加整数变量维度显著增加, 这对于 M1 的有效求解带来了极大挑战。通常, M1 紧凑表达式如下。

$$\begin{cases} \min f = W_{\alpha} (C_{\text{loss}}^{\text{Power}} + C_{\text{switch}}) + W_{\beta} f_{\text{U}} \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \geq 0, \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = 0 \\ \mathbf{x} \in \mathbf{R}, \mathbf{y} \in \{0, 1\}, \mathbf{z} \in \mathbf{Z} \end{cases} \quad (42)$$

式中: $\mathbf{g}$ 和 $\mathbf{h}$ 分别为不等式和等式向量约束; $\mathbf{x}$ 为连续变化的向量; $\mathbf{y} = [b_{t,ij,k}, \chi_{t,e}, \gamma_{t,e}]$ 为 $\{0, 1\}$ 二进制向量; $\mathbf{z} = [K_{t,ij}, N_{t,i}^{\text{CB}}]$ 为区间范围 $[\underline{z}, \bar{z}]$ 内的离散向量。

为加快日前阶段多时间尺度无功功率优化模型 M1 的求解效率, 本文针对 M1 引入基于诱导目标函数(IOF)的加速技术, 该方法通过在 M1 的目标函数中添加诱导因子辅助项, 从而实现分支定界法加速求解 MISOCP 问题的目的^[29]。为获得诱导因子需将 M1 中二进制变量和离散变量松弛为区间范围内连续变量, 以构造松弛的 SOCP 模型 M2, 如下。

$$\begin{cases} \min f = W_{\alpha} (C_{\text{loss}}^{\text{Power}} + C_{\text{switch}}) + W_{\beta} f_{\text{U}} \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \geq 0, \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = 0 \\ \mathbf{x} \in \mathbf{R}, \mathbf{y} \in [0, 1], \mathbf{z} \in \mathbf{R} \end{cases} \quad (43)$$

由于 M2 中不存在整数变量, 其可被高效求解。基于 M2 的优化结果可得到与二进制变量 $\mathbf{y}$ 相对应的诱导因子 $\xi_{t,i} \in \{v_{t,ij}, s_{t,i}, \sigma_{t,i}\}$, 计算如下。

$$\xi_{t,i} = \ell \cdot [1/z_{t,i}^0 - 1] \quad (44)$$

式中: $z_{t,i}^0 \in \{b_{t,ij,k}^0, \chi_{t,e}^0, \gamma_{t,e}^0\}$ 为 M2 中二进制变量 $\mathbf{y}$ 的

最优解; ℓ 为 IOF 的放缩参数。为避免式(44)中分母为 0 情况的发生, 如果 $z_{t,i}^0 < \varepsilon$ 令 $\xi_{t,i} = M$, 其中 ε 和 M 分别为较小和较大的整数值。

基于诱导因子, 可得到辅助项并将其添加到 M1 的目标函数中, 从而构造加速模型 M3, 如下。

$$\begin{cases} \min f = W_{\alpha} (C_{\text{loss}}^{\text{Power}} + C_{\text{switch}}) + W_{\beta} f_{\text{U}} + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=0}^{2\bar{K}_g} v_{t,ij} b_{t,ij,k} + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_e} (s_{t,i} \chi_{t,i} + \sigma_{t,i} \gamma_{t,i}) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \geq 0, \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = 0 \\ \mathbf{x} \in \mathbf{R}, \mathbf{y} \in \{0, 1\}, \mathbf{z} \in \mathbf{Z} \end{cases} \quad (45)$$

注意到, 原模型 M1 和松弛模型 M2 的优化解具有相关性。在模型 M2 中如果被松弛的二进制变量的优化解接近 1, 则在模型 M1 中相对应的二进制变量将极大可能为 1。从式(44)可以看出, 如果 $z_{t,i}^0 < z_{t,j}^0$ 则可得到 $\xi_{t,i} > \xi_{t,j}$, 对于一个最小化问题, $z_{t,i}^0 = 1$ 比 $z_{t,j}^0 = 1$ 会使得目标函数的增量更小。因此, IOF 方法会诱导较大的 $z_{t,i}^0$ 所对应的二进制变量在求解 M3 时为 1。以此来实现加速 M3 求解速度的目的。此外, 由于 M1 和 M3 的约束条件、决策变量是相同的, 即表明二者可行域没有改变, 使得 M1 和 M3 的优化解无显著差别, 从而确保了加速模型优化解的精确性。

此外, 日内阶段是基于给定的无功功率设备和储能装置调度策略进行优化决策, 不存在整数变量。因此, 通过采用 3.1 节的凸松弛和线性化方法, 原始日内滚动无功功率优化模型 N0 可以被转化为 N1。注意到 N1 不含有整数变量属于 SOCP 问题。通常, SOCP 本质上属于凸规划范畴, 解的最优性和计算的高效性显著提高, 可通过 CPLEX 直接求解以快速获得最优解。

2) 模型的求解流程

提出的柔性互联配电网无功功率优化方法包含日前和日内两个阶段的求解, 算法流程如图 3 所示。

算法具体步骤如下。

(1) 基于日前预测数据构造长时间尺度无功功率优化模型 M0, 具体如本文 2.1 节所示。

(2) 采用 3.1 节所述凸松弛和线性化方法将 M0 转化为 M1, 通过松弛 M1 中的整数变量可以构造出模型 M2。

(3) 采用 SOCP 优化包求解 M2 并基于式(44)计

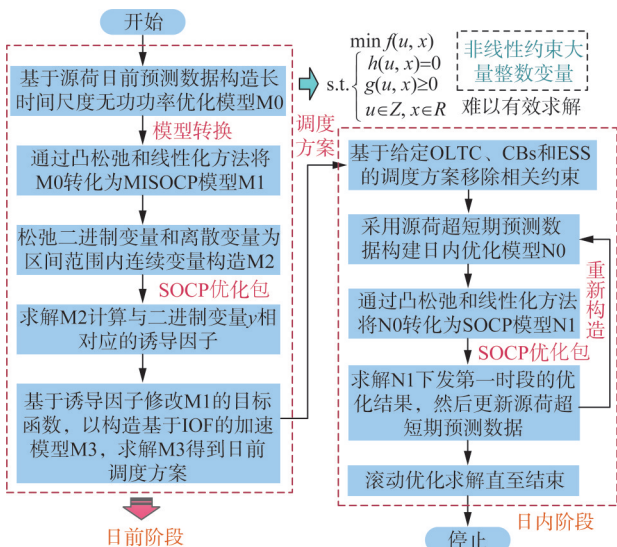


图3 多时间尺度优化方法求解流程

Fig. 3 Flow chart of multi-time scale optimization method

算诱导因子；在此基础上构造出基于 IOF 的加速模型 M3，求解 M3 得到日前调度方案。

(4) 基于日前阶段传递的优化结果，采用超短期预测数据构造日内模型 N0，如 2.2 节所述；然后采用 3.1 节所述方法将 N0 松弛转化为 N1。

(5) 求解 N1 并下发第一个时段的优化结果，进而不断更新源荷超短期预测数据并重新构造 N1，通过滚动优化直至优化周期结束。

4 算例分析

为验证本文所提方法的有效性，用 IEEE 33 节点系统构造含 E-SOP 的柔性互联配电系统，并进行验证分析。网络拓扑结构和各灵活性资源安装位置如图 4 所示。

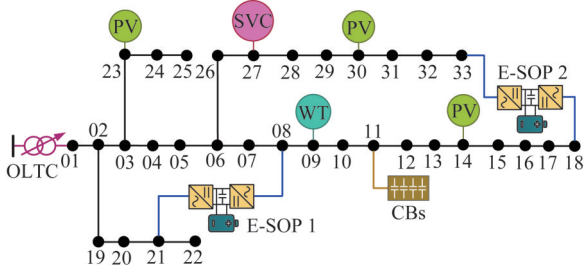


图4 基于 E-SOP 的柔性互联配电系统

Fig. 4 Flexible distribution system based on E-SOP

本文基于 MATLAB 平台开发上述多时间尺度无功功率优化模型计算程序，并调用商业求解器 Cplex 12.7.1 进行求解。测试系统在配置 Intel(R)

Core(TM) i7-8550U CPU @1.80 GHz，8 GB 内存的电脑上，操作系统为 Win10 64 位。算例的功率基值设为 10 000 kVA，电压基值设为 10 kV。算法涉及的相关参数如表 1 所示。

表 1 算法的参数设置

Tab. 1 Parameter settings of the algorithm

参数	数值	参数	数值
$\underline{U}, \bar{U}/\text{p. u.}$	0.95, 1.05	$\underline{U}_{\text{thr}}, \bar{U}_{\text{thr}}/\text{p. u.}$	0.98, 1.02
W_{α}	0.67	$k_{ij,0}$	1.0
W_{β}	0.33	$\cos\theta_i^{\text{DG}}$	1.0
c_0, c_1, c_2	0.001, 0.005, 0.02	Δk_{ij}	1%
$\underline{Q}_i^{\text{SOP}}, \bar{Q}_i^{\text{SOP}}/\text{kVA}$	-500, 500	$\bar{K}_{ij}$	3
$S_i^{\text{SOP}}/\text{kVA}$	600	$\bar{\Delta}^{\text{OLTC}}/\text{次}$	5
$S_i^{\text{DG}}/\text{MW}$	1.3(WT)/1(PV)	$q_i^{\text{CB}}/\text{kvar}$	50
$C_{\text{loss}}/(\text{美元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.08	$\bar{\Delta}^{\text{CB}}$	5
$C_{\text{tap}}/(\text{美元} \cdot \text{次}^{-1})$	1.40	$\bar{N}_i^{\text{CB}}/\text{次}$	5
$C_{\text{cap}}/(\text{美元} \cdot \text{次}^{-1})$	0.1	$\underline{Q}_i^{\text{SVC}}, \bar{Q}_i^{\text{SVC}}/\text{kvar}$	0, 200
$\bar{P}_e^{\text{dch}}, \bar{P}_e^{\text{ch}}/\text{kW}$	200	$\underline{S}_e^{\text{soc}}, \bar{S}_e^{\text{soc}}$	0.2, 0.9
ρ_d, ρ_c	0.9	$C_e^{\text{cap}}/\text{MWh}$	1
ε	0.1	M	100

4.1 日前无功功率优化结果分析

日前长时间尺度无功功率优化阶段，设置如下 5 种场景进行对比分析：场景 1 不执行无功功率优化策略；场景 2 基于 OLTC、CBs 进行无功功率优化；场景 3 基于 OLTC、CBs、SVC 进行无功功率优化；场景 4 基于 OLTC、CBs、SVC、单台 E-SOP 进行无功功率优化；场景 5 基于 OLTC、CBs、SVC、两台 E-SOP 进行无功功率优化。

表 2 所示为 5 种场景的优化结果，包含运行成本、网络损耗(各时段配电网和 E-SOP 运行损耗之和)和电压偏差(各时段所有节点相对于期望电压偏差之和，具体表达式如式(16)中的 f_0 所示)。

可以看出，场景 1 的日运行成本为 103.84 美

表 2 5 种场景的优化结果对比

Tab. 2 Comparison of optimization results in five scenarios

场景	OLTC 和 CB 成本/(美元·d ⁻¹)	网损成本/(美元·d ⁻¹)	总成本/(美元·d ⁻¹)	网络损耗/kWh	电压偏差/p. u.
1		103.84	103.84	1 298.0	3.227 6
2	7.5	83.85	91.35	1 048.2	1.050 2
3	7.5	75.95	83.45	949.4	1.079 0
4	3	75.01	78.01	937.6	0.849 2
5	0.1	68.73	68.83	859.1	0.276 4

元, 与之相比场景 2 的运行成本为 91.35 美元, 比场景 1 降低了 12.0 %, 同时电压偏差下降 67.5 %。这说明采用无功功率优化策略可显著降低系统运行成本, 并减小电压偏差。与场景 2 相比, 场景 3 增加了无功功率资源 SVC, 可有效降低运行成本。在此基础上, 场景 4 通过发挥 E-SOP 的时空灵活调控能力使得运行成本和电压偏差进一步有所改善。与此同时场景 5 中通过增加 E-SOP 的数量, 配电网的灵活调控能力进一步增强, 系统日运行总成本仅为 68.83 美元, 与场景 1—4 相比分别降低了 33.7 %、24.6 %、17.5 %、11.8 %, 运行经济性得以显著提高。此外, 场景 5 的网络损耗和电压偏差较之前 4 种场景也有较大改善。上述结果表明本文所提无功功率优化方法通过对离散和连续无功功率资源进行协调优化可显著降低运行成本, 并能改善运行效率和电压偏差。

图 5—6 分别展示了场景 2—5 等 4 种场景下离散无功功率设备 OLTC 和 CBs 的日前优化结果。

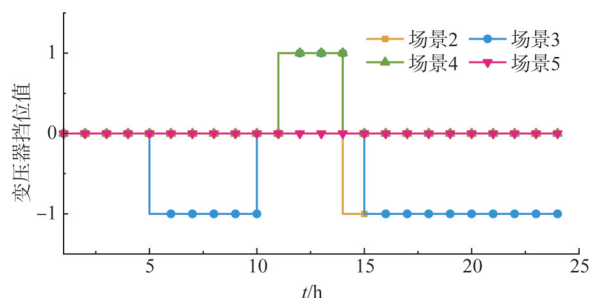


图 5 4 种场景中 OLTC 优化结果对比

Fig. 5 Comparison of OLTC under four scenarios

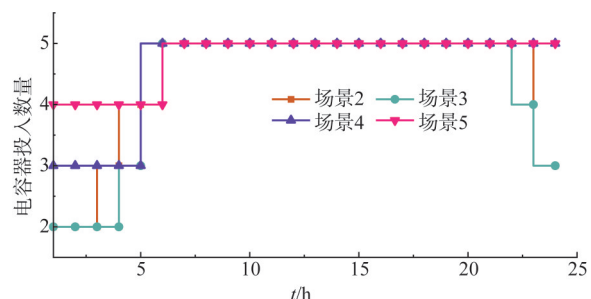


图 6 4 种场景中 CBs 优化结果对比

Fig. 6 Comparison of CBs under four scenarios

可以看出, 场景 2 和场景 3 中 OLTC 和 CBs 的动作次数均达到上限 5 次, 这是由于为了尽可能降低运行成本和电压偏差配电网需提供无功功率支撑。场景 4 中考虑了 E-SOP, 其具备有功潮流调控

和无功功率补偿功能, 使得 OLTC 和 CBs 的动作次数都降低至 2 次。动作成本为 3 美元, 相较于场景 2 和场景 3 的 7.5 美元降低了 60 %。场景 5 中, E-SOP 的数量增加至 2 台, 系统的灵活调控能力显著增加。因此, 在优化时段内 CBs 仅动作 1 次, 而 OLTC 没有动作。此时系统的无功需求主要由 SVC 和 E-SOP 提供。

图 7 所示为场景 5 中 E-SOP 的优化结果。

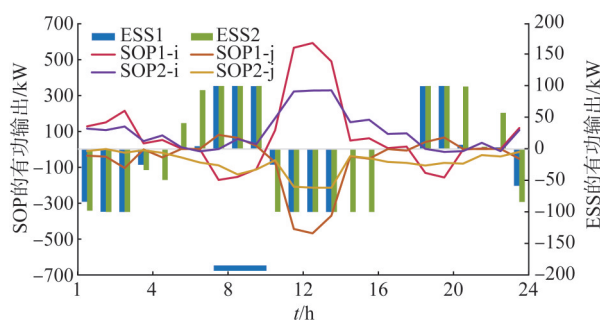


图 7 场景 5 中 E-SOP 的优化结果

Fig. 7 Optimization results of E-SOP under scenario 5

可以看出, 由于 ESS 具有充放电功能, 能够在时间尺度上对注入 E-SOP 的功率进行调控。这使得 SOP 所连接两侧馈线 i 、 j 的功率不再相同, 提高了系统灵活调控能力。与接入 SOP 相比, 系统日运行成本由 70.89 美元降至 68.83 美元; 网络损耗由 882.4 kWh 降至 859.1 kWh; 电压偏差也有所降低。

4.2 日内滚动优化结果分析

日内阶段基于日前 OLTC、CBs 以及 ESS 的调度结果对系统运行策略进行调整。基于源荷超短期预测结果, 以 15 min 为控制时间间隔实施滚动优化, 优化结果如图 8 所示。

图 8 所示为日内阶段 SOP 和 SVC 的优化结果。日前阶段是基于源荷预测数据进行优化调度, 然而长时间尺度预测精度存在一定误差, 需在日内阶段对调度策进行修正, 以提高模型对不确定性的适应能力。日内阶段的可调度资源为 SOP 和 SVC。08:00—18:00 之间新能源 (风电和光伏) 出力较大, 会影响配电网的潮流分布。在此场景下, 为减小系统网络损耗和电压偏差, SOP 在短时间尺度下通过频繁调控两侧输出的有功功率和无功功率以改善系统运行性能, 在此阶段 SVC 也增加无功功率输出对电压进行支撑。

为进一步验证日内滚动优化的有效性, 将其与

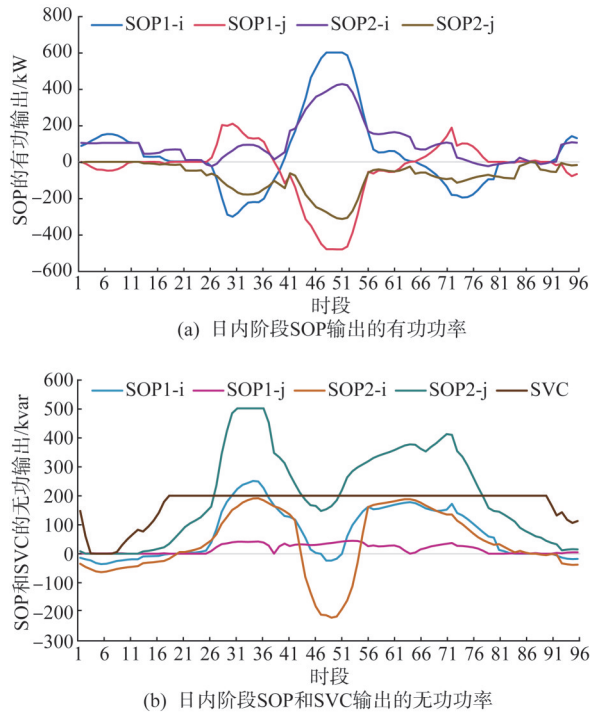


图8 日内阶段优化运行结果

Fig. 8 Optimization results during the intraday stage

日前优化(基于日前策略控制各资源, 日内执行该策略不进行优化)进行对比, 如表3所示。

表3 滚动优化策略结果分析

Tab. 3 Analysis of rolling optimization strategy results

场景	日前优化		滚动优化	
	网络损耗 /kWh	电压偏差 /p. u.	网络损耗 /kWh	电压偏差 /p. u.
3	821.3	0.397 2	794.5	0.002 4
4	925.7	1.254 4	912.4	0.659 2
5	1 056.5	0.917 4	1 024.6	0.711 0

可以看出, 在场景3—5中, 考虑源荷预测误差在日内对连续的快速调节设备的运行策略实施优化调整, 所提滚动优化网络损耗和电压偏差均小于日前优化, 经济性和安全性得以保障。

4.3 多时段模型求解方法性能分析

为验证多时段模型求解方法的可行性, 针对日前阶段上述4种场景分别采用文献[17]所提现有方法(CPLEX优化器直接求解)和本文所提方法(基于IOF的诱导加速求解)对4种场景进行求解, 并将计算结果进行对比分析, 结果如表4所示。

表4所示为场景2—5下采用现有方法和所提方法的优化结果。可以看出, 采用现有方法的直接求

表4 现有方法和所提方法优化结果对比

Tab. 4 Comparison of optimization results between existing and proposed methods

场景	方法	总成本 /(美元·d ⁻¹)	网络损耗 /kWh	电压偏差 /p. u.	求解时 间/s
2	现有方法	91.35	1 048.2	1.050 2	34.6
	所提方法	91.35	1 048.2	1.050 2	27.8
3	现有方法	83.45	949.5	1.079 0	50.8
	所提方法	83.45	949.4	1.079 2	24.9
4	现有方法	78.01	937.6	0.849 2	57.4
	所提方法	78.01	937.7	0.850 6	46.3
5	现有方法	68.83	859.1	0.276 4	645.5
	所提方法	68.70	857.1	0.273 2	516.2

解方式和所提方法的IOF加速方式在所有场景中的总成本、网络损耗以及电压偏差基本一致, 这说明所提方法具有较高的精确性。与此同时, 4种场景中所提方法的计算时间均小于现有方法, 计算速度提高了19.3%~50.9%。上述结果表明所提出的求解方法在求解可行性方面令人满意, 能降低日前长时间尺度无功功率优化模型的计算复杂度, 保证解精确性的同时显著提高了计算效率。此外, 日内滚动优化的计算时间为0.16~0.20 s, 远小于优化间隔15 min, 具有较高的计算效率, 能满足日内运行控制要求。

为验证E-SOP损耗模型凸松弛结果的精确性, 定义如下松弛误差。

$$\Delta^1 = \left| h_{1,m}^{AC} - \sqrt{(P_{1,m}^{SOP})^2 + (Q_{1,m}^{SOP})^2} \right| \quad (46)$$

$$\Delta^2 = \left| h_{2,m}^{AC} - ((P_{1,m}^{SOP})^2 + (Q_{1,m}^{SOP})^2) \right| \quad (47)$$

$$\Delta^3 = \left| h_{2,n}^{DC} - (P_{1,n}^{VSC})^2 \right| \quad (48)$$

式中: Δ^1 和 Δ^2 分别为E-SOP中AC/DC换流器损耗松弛模型, 即式(34)—(35)的松弛误差; Δ^3 为E-SOP中DC/DC换流器损耗松弛模型, 即式(38)的松弛误差。

日前无功功率优化阶段对E-SOP中AC/DC和DC/DC换流器损耗模型在各时段的松弛误差进行计算。以E-SOP1为例, 其*i*、*j*和*k*端口损耗模型对应的松弛误差 Δ^1 、 Δ^2 和 Δ^3 , 结果如图9所示。

可以看出, 各换流器损耗在各时段的松弛误差在10⁻⁵数量级, 该值较小, 且该精度能够较好地满足实际工程的应用需求。与此同时, 算例结果表明各支路二阶锥松弛误差也在该数量级。这验证了本

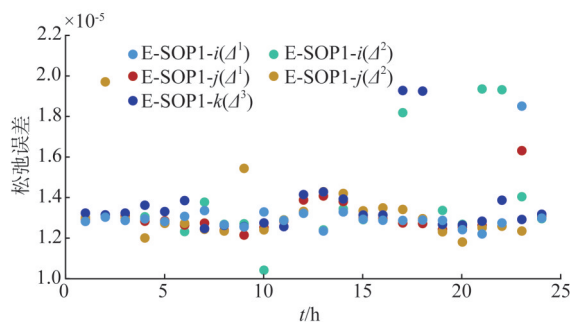


图9 E-SOP1 损耗松驰误差结果

Fig. 9 Relaxation error results of E-SOP1 power losses

文所提优化方法具有较好的精确性。

5 结语

可再生能源大规模接入引发的双向潮流对配电网的电压和损耗带来了显著影响。本文针对配备自储能智能软开关的柔性互联配电系统提出了一种多时间尺度无功功率优化方法。主要结论如下。

1) 所构建的无功功率优化模型充分考虑了离散无功功率设备和连续无功功率设备的灵活调控能力, 针对快、慢设备响应速度的差异提出了多时间尺度无功功率优化方法, 实现了各类型资源在日前和日内时间尺度上的协调控制。该方法在降低运行成本的同时能有效减少配电网的网络损耗和电压偏差。

2) 所提方法全面考虑了自储能智能软开关的损耗模型, 采用端口视在功率的二次函数进行建模提升了无功功率优化模型的精确性。进一步通过凸松弛和线性化方法对模型进行转换, 增强了模型的求解可行性。

3) 提出了一种基于诱导目标函数的多时间尺度无功功率优化模型加速求解方法。通过对模型中的离散变量进行松弛处理, 计算诱导因子并将其作为辅助项添加至目标函数中。算例结果表明该方法在确保求解精确性的同时显著提升了计算效率, 求解可行性方面表现优异。

参考文献

- [1] 苏向敬, 彭赫, 米阳, 等. 基于线性规划的中低压不平衡配电网电压无功实时优化[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4719–4731.
SU Xiangjing, PENG He, MI Yang, et al. Linear programming-based real-time volt-optimization of unbalanced MV-LV distribution networks[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4719–4731.
- [2] 杨顺吉, 李庆生, 明志勇, 等. 考虑源荷随机性的配电网多目标概率无功功率优化[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 125

– 135.

- YANG Shunji, LI Qingsheng, MING Zhiyong, et al. Multi-objective probabilistic reactive power optimization of distribution network considering the randomness of source and load[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 125–135.
- [3] 李子健, 郭佩乾, 马宁宁, 等. 融合双重策略粒子群算法的分布式电源配电网无功功率优化[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 14–22, 81.
LI Zijian, GUO Peiqian, MA Ningning, et al. Reactive power optimization for distribution system with DG by particle swarm optimization algorithm integrating dual strategies[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 14–22, 81.
- [4] 孙浩锋, 章健, 熊壮壮, 等. 含风光储联合发电系统的主动配电网无功功率优化[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 104–110, 125.
SUN Haofeng, ZHANG Jian, XIONG Zhuangzhuang, et al. Reactive power optimization of active distribution network with wind-photovoltaic-energy hybrid generation system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 104–110, 125.
- [5] 李鹏, 姜磊, 王加浩, 等. 基于深度强化学习的新能源配电网双时间尺度无功功率电压优化[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6255–6266.
LI Peng, JIANG Lei, WANG Jiahao, et al. Optimization of dual-time scale reactive voltage for distribution network with renewable energy based on deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6255–6266.
- [6] YASHODHAN P, BIKASH C, RABIH A. Distribution voltage control considering the impact of PV generation on tap changers and autonomous regulators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 182–192.
- [7] DING T, LIU S, YUAN W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 301–311.
- [8] ZHENG W, WU W, ZHANG B, et al. A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1021–1033.
- [9] 祈琪, 姜齐荣, 许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4664–4676.
QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664–4676.
- [10] 王皓靖, 郭佩乾, 时珊珊, 等. 中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(5): 13–23.
WANG Haojing, GUO Peiqian, SHI Shanshan, et al. Application status and prospects of multi-substation flexible interconnection technology in medium-voltage distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 13–23.
- [11] 倪伟东, 范心明, 孙广慧, 等. 基于元模型的智能软开关就地控制策略优化方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(7): 73–80.
NI Weidong, FAN Xinming, SUN Guanghui, et al. Optimization method of local control strategy of soft open point based on metamodel[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(7): 73–80.
- [12] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用

- [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1 – 14.
- WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1 – 14.
- [13] 董雷, 吴怡, 张涛, 等. 基于强化学习的含智能软开关主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 59 – 68.
- DONG Lei, WU Yi, ZHANG Tao, et al. Reinforcement learning based double-layer optimization method for active distribution network with soft open point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 59 – 68.
- [14] 魏承志, 李俊豪, 涂春鸣, 等. 计及变压器与 SOP 损耗特性的柔性互联配电网优化调控策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 69 – 78.
- WEI Chengzhi, LI Junhao, TU Chunming, et al. Optimal regulation and control strategy for flexible interconnected distribution network considering loss characteristics of transformers and soft open points [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 69 – 78.
- [15] 张沈习, 王浩宇, 李然, 等. 考虑智能软开关接入的主动配电网扩展规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 48 – 61.
- ZHANG Shenxi, WANG Haoyu, LI Ran, et al. Active distribution network expansion planning method considering the integration of soft open point [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 48 – 61.
- [16] 孙守晶, 丛伟, 邱吉福, 等. 含智能软开关的智能配电网分布式供电恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 79 – 85.
- SUN Shoujing, CONG Wei, QIU Jifu, et al. Distributed power restoration method for smart distribution network with soft open point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 79 – 85.
- [17] 郑焕坤, 石甜静. 基于智能软开关和无功功率补偿装置的配电网双层优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 117 – 123.
- ZHENG Huankun, SHI Tianjing. Bi-level optimization of distribution network based on soft open point and reactive power compensation device [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 117 – 123.
- [18] LI P, JI H, WANG C, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1430 – 1442.
- [19] HUANG Z, ZHANG Y, XIE S. Data-adaptive robust coordinated optimization of dynamic active and reactive power flow in active distribution networks [J]. Renewable Energy, 2022(188): 164 – 183.
- [20] YANG X, XU C, ZHANG Y, et al. Real-time coordinated scheduling for ADNs with soft open points and charging stations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5486 – 5499.
- [21] JIANG X, ZHOU Y, MING W, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1899 – 1910.
- [22] WANG C, SUN J, HUANG M, et al. Two-stage optimization for active distribution systems based on operating ranges of soft open points and energy storage system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(1): 66 – 79.
- [23] 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 Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 758 – 773, 923.
- [24] HU R, WANG W, WU X, et al. Interval optimization based coordinated control for distribution networks with energy storage integrated soft open points [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022(136): 107725.1 – 107725.12.
- [25] ZHANG T, MU Y, ZHAO J, et al. Distributed OPF for PET-based AC/DC distribution networks with convex relaxation and linear approximation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4340 – 4354.
- [26] 郭清元, 吴杰康, 莫超, 等. 基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1385 – 1396.
- GUO Qingyuan, WU Jiekang, MO Chao, et al. A method for multi-objective coordination optimization of voltage and reactive power in distribution networks based on mixed integer second-order cone programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1385 – 1396.
- [27] HU D, YE Z, GAO Y, et al. Multi-agent deep reinforcement learning for voltage control with coordinated active and reactive power optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4873 – 4886.
- [28] SARANTAKOS I, PEKER M, ZOGRAFOU-BARREDO N, et al. A robust mixed-integer convex model for optimal scheduling of integrated energy storage-soft open point devices [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 4072 – 4087.
- [29] LI P, JI H, WANG C, et al. Optimal operation of soft open points in active distribution networks under three-phase unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 380 – 391.
- [30] BAI Y, ZHONG H, XIA Q, et al. A two-level approach to AC optimal transmission switching with an accelerating technique [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1616 – 1625.

收稿日期: 2024-04-10; 网络首发日期: 2024-07-31

作者简介:

贺继锋(1986), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统规划、优化运行;

张焱哲(1997), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力供需、电力系统优化调度;

张涛(1992), 男, 通信作者, 讲师, 博士, 研究方向为配电网优化调度、弹性电网, zhangtao@hfut.edu.cn。