

引用格式:王晋君,李童宇,陈衡,等.基于二阶锥规划最优潮流计算的主动配电网动态重构研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):58-66.

Citation: WANG Jinjun, LI Tongyu, CHEN Heng, et al. Dynamic reconstruction of active distribution networks based on second-order cone programming for optimal power flow calculation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 58-66.

# 基于二阶锥规划最优潮流计算的主动配电网 动态重构研究

王晋君<sup>1</sup>, 李童宇<sup>1</sup>, 陈衡<sup>1</sup>, 刘涛<sup>2</sup>, 陈宏刚<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 2. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100086)

**摘要:**为有效应对大规模可再生能源接入电网的不确定性与波动性,实现配网最优运行,提出一种考虑分布式电源时变性与负荷需求特性的动态网络重构优化方法。先针对传统静态支路潮流模型的非凸性,引入松弛变量,将其转化为二阶锥约束,建立基于二阶锥松弛的最优潮流模型;再综合考虑主动配电网环境中的主动管理元素等约束,在保证电压稳定性的前提下,以网络损耗与购电量最小为优化目标,建立高比例分布式电源接入下的多时段配电网重构模型;最后,采用YALMIP工具包和Gurobi求解器进行建模求解,并通过适配IEEE 33节点模型进行实证分析。算例结果表明:所提方案得到的系统期望网络损耗值从0.176 MW减小到0.097 MW,其网络损耗值比粒子群算法的降低了11.95%,其电压水平比粒子群算法的提高了0.76%。该模型的有效性得到了验证。

**关键词:**分布式电源;二阶锥规划;最优潮流;配电网重构;主动管理元素

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.006 中图分类号: TM711 文章编号: 1673-9140(2024)05-0058-09

## Dynamic reconstruction of active distribution networks based on second-order cone programming for optimal power flow calculation

WANG Jinjun<sup>1</sup>, LI Tongyu<sup>1</sup>, CHEN Heng<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, CHEN Honggang<sup>1</sup>

(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Guo Dian Tong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

**Abstract:** To effectively address the uncertainty and volatility brought by the large-scale integration of renewable energy into the grid and achieve optimal operation of the distribution network, a dynamic network reconfiguration optimization method considering the time-varying nature of distributed generation (DG) and load demand characteristics is proposed. Firstly, to tackle the non-convexity of the traditional static branch power flow model, slack variables are introduced to transform it into second-order cone constraints, establishing an optimal power flow model based on second-order cone relaxation. Then, considering the constraints of active management elements in the active distribution network environment, a multi-period distribution network reconfiguration model under high penetration of DG is constructed with the optimization objectives of minimizing network losses and electricity purchases while ensuring voltage stability. Finally, the Yalmip toolbox and Gurobi solver are employed for modeling and solving, and the IEEE33-node model is adapted for verification and analysis. The results of the case study demonstrate that the proposed scheme reduces the expected network loss value from 0.176 MW to 0.097 MW, a decrease of 44.89%, and improves the voltage level by 1.40%, thereby validating the effectiveness of the model.

收稿日期: 2023-08-24; 修回日期: 2024-04-17

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-142-XG)

通信作者: 陈衡(1989—),男,博士,副教授,主要从事电网提质增效技术、智慧电力系统以及系统综合评价等方面的研究;E-mail: heng@ncepu.edu.cn

**Key words:** distributed power supply; second order cone programming; optimal power flow; reconstruction of active distribution networks; active management element

近年来,分布式电源(distributed generation, DG)规模的不断扩大和电力系统的智能化,对配电网运行可靠性与灵活性提出了更高的要求,也为主动配电网环境下的主动管理、控制、优化等带来了新挑战<sup>[1]</sup>。电力系统的非凸性与其中存在离散变量等特点,也使得传统配电网优化方法的效率逐渐走低。因此,亟须找到适用于主动配电网的高效算法。

启发式算法凭借其建模场景丰富等特点,广泛应用于非线性规划问题求解中。文献[2]通过研究杂交粒子群优化算法,改善了随机潮流计算下的交、直流配电网电压水平。文献[3]基于安德森加速算法,构建了输配协同低碳最优潮流模型,实现了含DG的电网系统配电侧效益的最大化。文献[4]基于生物地理学算法,提出了以网络损耗和开关操作次数最小化为目标函数的优化模型,这种低开关次数的优化模型具有稳定电压、降低网络损耗的效果。但启发式算法在处理非线性约束时,容易陷入局部最优解,导致算法速度变慢,其结果准确性亦难以得到保证。文献[5]提出了一种基于改进麻雀搜索算法的重构方法,改善了模型最优解质量的问题。此外,更多的学者开始着手研究适用于复杂潮流计算的数值分析法。文献[6-7]首次地提出了采用二阶锥松弛(second order conic relaxation, SOCR)方法来解决最优潮流模型中的非凸性约束问题,并验证了其算法的准确性。文献[8-10]采用二阶锥规划,求解了考虑需求侧管理的最优潮流模型,有效降低了系统的网络损耗和用户用电成本。文献[11-12]将SOCR法与Big-M法和McCormick法进行了对比,并对SOCR法准确性的充分条件进行了补充,验证了其算法的准确性。文献[13]通过识别径向网络拓扑、切换联络线和分段线,实现了对最优化分布式能源的有效调度。配电网重构作为配电网优化的重要手段,能有效提高电力系统的可靠性。文献[14]以网络损耗最小化为目标,建立了网络重构模型,通过融合启发式规则验证了其方法的优越性。文献[15-17]针对配电网故障特征,利用SOCR配电网重构法,构建了供电恢复模型。文献[18-19]针对高渗透DG配电网的重构问题,提出了双层优化调度模型,消除了由DG波动性与随机性带来的影响。文献[20]综合考虑网络损耗、弃风、弃光与开关等成本,构建了

考虑软开关(soft open point, SOP)和需求侧响应(demand response, DR)的配电网重构模型,并对其进行了求解。这些研究均集中于静态最优潮流问题,而在实际配电系统中,负荷是实时变化的。为提高能源利用率,需考虑在多个连续时间区间内的配网负荷波动情况下的全局性的配电网的优化重构。此外,在对配电网重构的研究中,鲜有考虑主动管理设备约束对模型的影响的,这也使得最终的研究结果难以保证其准确性与适用性。

基于这些研究背景,本文建立了基于二阶锥规划的主动配电网动态最优潮流模型框架,提出了考虑各主动管理元素等关键约束在内的主动配电网重构模型,进而将其复杂的非线性约束问题转化为包含整数变量的二阶锥规划问题,通过YALMIP建模工具包与Gurobi求解器对其进行求解,并将其结果与粒子群算法和传统遗传算法的结果进行对比,验证了该算法的准确性和优越性。

## 1 多时段动态最优潮流模型

可再生能源发电机组的输出受环境等外部因素影响,而负荷需求主要受人为因素的影响,具有明确的时间序列特征<sup>[21-23]</sup>。不论是传统配电网,还是包含双向潮流在内的主动配电网,其主要运行模式均为辐射状运行,如图1所示。在图1中, $n$ 表示负荷的数目, $PV_i(i=1,2,\dots,n)$ 表示光伏发电电源。

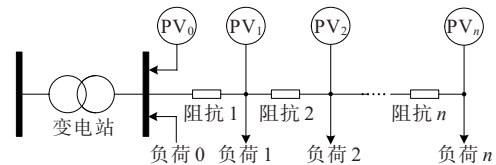


图1 接入分布式光伏的辐射状配电网示意

Figure 1 Structure diagram of radial distribution network with DG access

### 1.1 静态最优潮流模型

目前,基于支路潮流模型的最优潮流的模型可表示为<sup>[24]</sup>

$$\min f(p, q, P, Q, U, I) \quad (1)$$

$$\begin{cases} p_j = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij} - I_{ij}^2 r_{ij}) + g_j U_j^2, \forall j \in M \\ q_j = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij} - I_{ij}^2 x_{ij}) + b_j U_j^2, \forall j \in M \end{cases} \quad (2)$$

$$U_i^2 = U_i^2 - 2(P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) + I_{ij}^2(r_{ij}^2 + x_{ij}^2), \forall ij \in E \quad (3)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2}, \forall ij \in E \quad (4)$$

$$I_{\min, ij} \leq I_{ij} \leq I_{\max, ij}, \forall ij \in E \quad (5)$$

$$U_{\min, j} \leq U_j \leq U_{\max, j}, \forall j \in M \quad (6)$$

$$\begin{cases} p_j \in R_j^p \\ q_j \in R_j^q \end{cases}, \forall j \in M \quad (7)$$

式(1)~(7)中,  $p$ 、 $q$ 分别为节点注入的有功和无功功率;  $P$ 、 $Q$ 为支路潮流;  $U$ 为节点电压;  $I$ 为支路电流;  $i$ 、 $j$ 为支路首、末端节点;  $p_j$ 、 $q_j$ 分别为节点  $j$  注入的有功和无功功率;  $r$ 为支路电阻;  $x$ 为支路电抗;  $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$ 、 $I_{ij}$ 、 $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$ 分别为以  $i$  为首端  $j$  为末端支路的有功、无功、电流、电阻和电抗值;  $g_j$ 、 $b_j$ 分别为节点  $j$  的电导和电纳值;  $U_j$ 为节点  $j$  的电压值;  $M$ 为所有节点的集合;  $E$ 为所有支路的集合;  $I_{\min, ij}$ 和  $I_{\max, ij}$ 分别为支路  $ij$  的最小和最大允许电流值;  $U_{\min, j}$ 和  $U_{\max, j}$ 分别为节点  $j$  的最小和最大电压值;  $R_j^p$ 和  $R_j^q$ 分别为节点  $j$  的有功和无功功率输入域;  $\delta(j)$ 为以  $j$  为首端支路的末端节点集合;  $\pi(j)$ 为以  $j$  为末端支路的首端节点集合。这些变量均为最优潮流优化变量。

式(1)为该优化模型的目标函数,其既可以是网络损耗,也可以是节点购电量等;式(2)~(6)为公共约束条件,其包含潮流平衡约束和安全约束,适用于所有的辐射状网络最优潮流计算<sup>[25]</sup>;式(7)为节点注入功率约束条件。

为简化问题,将基础支路最优潮流模型中的非线性约束进行SOCR处理,将其转化为易于求解的二阶锥凸约束<sup>[26]</sup>。转化时引入变量:

$$\tilde{I}_{ij} = I_{ij}^2 \quad (8)$$

$$\tilde{U}_j = U_j^2 \quad (9)$$

式(8)、(9)中,  $\tilde{I}_{ij}$ 和  $\tilde{U}_j$ 分别为某一时段内支路  $ij$  的电流二次方和节点  $j$  电压的二次方。

则简化后的模型变为

$$\min f(p, q, P, Q, \tilde{U}, \tilde{I}) \quad (10)$$

$$\begin{cases} p_j = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij} - \tilde{I}_{ij}r_{ij}) + g_j \tilde{U}_j, \forall j \in M \\ q_j = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij} - \tilde{I}_{ij}x_{ij}) + b_j \tilde{U}_j, \forall j \in M \end{cases} \quad (11)$$

$$\tilde{U}_i - 2(P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) + \tilde{I}_{ij}(r_{ij}^2 + x_{ij}^2), \forall ij \in E \quad (12)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{U}_j \end{matrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{U}_j, \forall ij \in E \quad (13)$$

式(13)中,  $\|\cdot\|_2$ 表示二范数。

$$I_{\min, ij}^2 \leq \tilde{I}_{ij} \leq I_{\max, ij}^2, \forall ij \in E \quad (14)$$

$$U_{\min, j}^2 \leq \tilde{U}_j \leq U_{\max, j}^2, \forall j \in M \quad (15)$$

## 1.2 动态最优潮流模型

式(10)~(15)为SOCR转化后的静态最优潮流基本形式,其准确性适用于大部分配电网结构网络<sup>[24]</sup>。然而,静态最优潮流方法仅适用于单一时段模型优化问题,实际运行的模型通常是多时段模型优化问题。因此,将该模型进一步扩展到动态优化领域,引入时间变量,得到基于SOCR的多时段动态潮流模型,即

$$\begin{cases} \min \sum_{t \in T} f(x_t) \\ \sum_{t \in T} C_t x_t = d \\ \sum_{t \in T} B_t x_t \leq c \\ \|A_t x_t + f_t\|_2 \leq b_t^T x_t \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $x_t$ 为时段  $t$  的系统状态变量;  $T$ 为总时段数;  $C_t$ 、 $B_t$ 、 $A_t$ 、 $f_t$ 、 $b_t$ 为相应系数矩阵或向量;  $d$ 和  $c$ 表示各时段各支路下的二阶锥约束向量。

该二阶锥规划问题可采用整数变量,将其转化为混合整数二阶锥规划问题,并可通过Gurobi求解器对其进行计算。

## 2 计及管理元素的主动配电网重构模型

### 2.1 目标函数

以配电网网络损耗和向主网购电量最小为目标函数,即

$$\min f = \sum_{t=1}^T (g_{1,t} + g_{2,t}) \quad (17)$$

式中,  $g_{1,t}$ 为系统  $t$  时段内的总有功损耗;  $g_{2,t}$ 为系统  $t$  时段内向主网的购电量。其有功损耗具体表达式为

$$g_{1,t} = \sum_{ij \in E} I_{ij,t}^2 R_{ij} \Delta t \quad (18)$$

式中,  $I_{ij,t}$ 为  $t$  时段支路  $ij$  电流的有效值;  $R_{ij}$ 为支路  $ij$  的电阻值。通过最小化网络损耗和购电量,能提高系统中电流分布的稳定性,保证系统运行的经济性和可持续性。

### 2.2 约束条件

主动管理元素主要包括:

1) 有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC);

2) 无功调节装置,包括分组投切电容器组(capacitor banks, CB)和静止无功补偿器(static var compensator, SVC);

3) 有功调节,包括储能装置(energy storage system, ESS)和电动汽车;

4) 分布式电源调节,包括光伏和风机<sup>[27]</sup>。

### 2.2.1 OLTC约束

OLTC能在动态运行中根据负荷需求进行电压调节设置。因此,在增加OLTC后,变电站母线节点 $V_0$ 变为可调变量<sup>[28]</sup>。在实际运行中,其受到调节次数的约束条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{i,1,t} \geq \sigma_{i,2,t} \geq \sigma_{i,S_w,t}, \quad \forall t, \forall i \in B \\ \delta_{i,t}^{\text{in}} + \delta_{i,t}^{\text{de}} \leq 1, \quad \forall t, \forall i \in B \\ \sum_s \sigma_{i,s,t} - \sum_s \sigma_{i,s,t-1} \geq \delta_{i,t}^{\text{in}} - \delta_{i,t}^{\text{de}} S_{Ri}, \quad \forall t, \forall i \in B \\ \sum_s \sigma_{i,s,t} - \sum_s \sigma_{i,s,t-1} \leq \delta_{i,t}^{\text{in}} S_{Ri} - \delta_{i,t}^{\text{de}}, \quad \forall t, \forall i \in B \\ \sum_{t \in T} (\delta_{i,t}^{\text{in}} + \delta_{i,t}^{\text{de}}) \leq N_i^{\text{max}}, \quad \forall i \in B \end{array} \right. \quad (19)$$

式中, $\sigma_{i,1,t}$ 、 $\sigma_{i,2,t}$ 、 $\sigma_{i,S_w,t}$ 均为0-1标识变量,分别为 $t$ 时段的OLTC档位1、2、最高档位与档位 $S$ ;  $B$ 为包含变压器在内的节点集合; $\delta_{i,t}^{\text{in}}$ 和 $\delta_{i,t}^{\text{de}}$ 分别为 $t$ 时段的变压器档位调节变化标识,均为0-1变量; $s$ 为变压器档位; $S_{Ri}$ 为最大档位; $N_i^{\text{max}}$ 为 $T$ 时段内变压器档位最大可调节次数。

### 2.2.2 无功调节约束

1) CB约束条件。

该约束条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{i,t} = y_{i,t} Q_i^{\text{step}}, \quad \forall t, \forall i \in B_c \\ y_{i,t} \leq Y_i^{\text{max}} \end{array} \right. \quad (20)$$

式中, $Q_{i,t}$ 为节点 $i$ 在时段 $t$ 内所投运CB的总功率; $y_{i,t}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时段的投运组数; $Q_i^{\text{step}}$ 为每组CB的补偿功率; $B_c$ 为含CB在内的节点集合; $Y_i^{\text{max}}$ 为节点 $i$ 连接CB组数上限。为保证设备寿命和运行经济性,还应限制多时段内CB总操作次数,即

$$\sum_{t \in T} |y_{i,t} - y_{i,t-1}| \leq N_i^{\text{CB,max}}, \quad \forall t, \forall i \in B_c \quad (21)$$

式中, $N_i^{\text{CB,max}}$ 为 $T$ 时段的CB操作次数上限。

2) SVC约束条件。

该约束条件为

$$Q_i^{\text{min}} \leq Q_{i,t} \leq Q_i^{\text{max}}, \quad \forall t, \forall i \in B_s \quad (22)$$

式中, $Q_{i,t}$ 为节点 $i$ 处SVC在 $t$ 时段补偿功率大小; $Q_i^{\text{max}}$ 和 $Q_i^{\text{min}}$ 分别为节点 $i$ 处SVC补偿功率的上、下

限; $B_s$ 为含SVC在内的节点集合。为了解决高比例分布式电源接入引起的电压越限问题<sup>[29]</sup>,设SVC的补偿下限约束为 $Q_i^{\text{min}} < 0$ 。

### 2.2.3 储能装置约束

对多时段最优潮流模型,储能装置主要考虑的是充(放)电状态约束与储能电池剩余容量约束,即

$$s_{i,t}^{\text{dis}} + s_{i,t}^{\text{ch}} \leq 1, \quad \forall i \in B_e \quad (23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{i,t}^{\text{dis}} P_i^{\text{dis,min}} \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq s_{i,t}^{\text{dis}} P_i^{\text{dis,max}} \\ s_{i,t}^{\text{ch}} P_i^{\text{ch,min}} \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq s_{i,t}^{\text{ch}} P_i^{\text{ch,max}} \end{array} \right. \quad (24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{i,t+1} = E_{i,t} + \alpha_i^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} - \alpha_i^{\text{dis}} P_{i,t}^{\text{dis}} \\ E_i^{\text{min}} \leq E_{i,t} \leq E_i^{\text{max}} \end{array} \right. \quad (25)$$

式(23)~(25)中, $B_e$ 为含储能装置在内的节点集合; $s_{i,t}^{\text{ch}}$ 和 $s_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别为节点 $i$ 处储能在 $t$ 时段的充、放电状态; $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别表示节点 $i$ 处储能在 $t$ 时段的充、放电功率; $P_i^{\text{ch,max}}$ 、 $P_i^{\text{ch,min}}$ 、 $P_i^{\text{dis,max}}$ 和 $P_i^{\text{dis,min}}$ 分别为储能装置充电功率的上、下限与放电功率的上、下限; $E_{i,t}$ 为节点 $i$ 处储能在 $t$ 时段的电量; $E_i^{\text{min}}$ 和 $E_i^{\text{max}}$ 分别为节点 $i$ 处储能的最大与最小储能寿命值; $\alpha_i^{\text{ch}}$ 为第 $i$ 处节点的充电效率系数,其值介于0和1之间; $\alpha_i^{\text{dis}}$ 为第 $i$ 处节点的放电效率系数,其值通常大于1。

### 2.2.4 DG功率约束

DG接入主要考虑其允许弃电的情况。随着技术的进步,部分DG不仅与有功出力相关,还对电网产生一定的无功影响<sup>[30]</sup>。因此,包含DG无功方面的主动管理研究主要分为以下2个部分。

1) 恒功率因数控制。

该约束条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\text{pre}} \\ Q_{i,t} = F_{i,t} P_{i,t} \end{array} \right., \quad \forall i \in B_d \quad (26)$$

式中, $P_{i,t}$ 和 $P_{i,t}^{\text{pre}}$ 分别为节点 $i$ 在 $t$ 时段内DG实际出力和预测出力; $B_d$ 为含DG在内的节点集合; $Q_{i,t}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时段内DG无功功率大小; $F_{i,t}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时段的无功功率与有功功率的比值。

2) 可变功率因数控制。

该约束条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\text{pre}} \\ Q_{i,t} = F_{i,t} P_{i,t} \\ F_i^{\text{min}} \leq F_{i,t} \leq F_i^{\text{max}} \\ Q_i^{\text{min}} \leq Q_{i,t} \leq Q_i^{\text{max}} \end{array} \right., \quad \forall i \in B_d \quad (27)$$

式中, $F_{i,t}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时段的DG变比调节; $F_i^{\text{max}}$ 和 $F_i^{\text{min}}$ 为节点 $i$ 的DG变比调节的上、下限; $Q_i^{\text{max}}$ 和 $Q_i^{\text{min}}$ 分别为节点 $i$ 的无功功率的最大与最小值。

### 2.2.5 网络结构约束

为保证配电网在重构过程中能够正常运行,避免出现电力传输中断和设备运行问题,模型还要满足连通性约束与辐射状约束<sup>[31]</sup>,即

$$\begin{cases} k_{di} + \sum_{j \in C(i)} \alpha_{ij,t} k_{ij,t} = 0 \\ N_b = N_n - N_s \end{cases} \quad (28)$$

式中, $k_{di}$ 为节点*i*的虚拟负荷(可以选其为单位1); $\alpha_{ij,t}$ 为*t*时段内支路*ij*的运行状态,当支路*ij*为闭合状态时, $\alpha_{ij,t}=1$ ;当支路*ij*为断开状态时, $\alpha_{ij,t}=0$ ;  $k_{ij,t}$ 为*t*时段内流过支路*ij*的虚拟流量; $N_b$ 为支路数; $N_n$ 为节点数; $N_s$ 为电源数。

### 2.2.6 开关动作次数限制。

该约束条件为

$$\sum_{ij}^L |\alpha_{ij,t} - \alpha_{ij,t-1}| \leq N_m \quad (29)$$

式中, $L$ 为所有支路集合; $N_m$ 为最大动作开关数。

## 3 算例分析

本文采用改进的IEEE 33节点模型进行分析计算(如图2所示),各节点用户类型数据见表1,网络参数详见文献[29]。为了保证模型的适用性,在基础网络中添加了OLTC、CB、SVC、ESS与光伏和风机等主动管理元素。其中,OLTC变比范围设定为 $1 \pm 6\%$ ;CB接入节点为节点5和15,单位容量为0.05 MVar;SVC接入节点为节点5、15和31,其补偿范围分别为 $[-0.2, 0.6]$ 、 $[-0.1, 0.4]$ 和 $[-0.1, 0.3]$ ;ESS接入节点为节点15和32,其功率极限分别为0.3、0.2 MW,其容量极限分别为1.0、0.5 MW·h,其充电效率为0.9,其放电效率为1.1。在图2中, Wind和PV表示分布式风电和光伏电源,OLTC和CB表示变压器和电容器,SVC和ESS分别表示无功补偿器和储能系统。

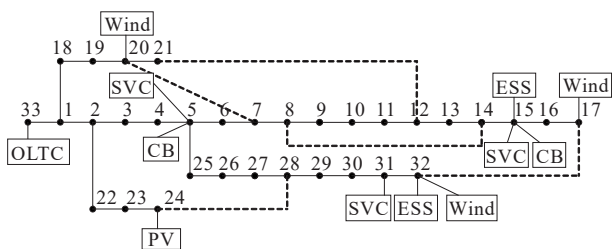


图2 含主动管理设备的改进33节点配电网

Figure 2 Improved 33-node distribution network with active management devices

表1 各节点用户类型

Table 1 User type of each node

用户类型	接入节点	用户类型	接入节点
居民	22-23,25-30	商业	9-14,16
大用户	5,15,31	农业	17,20,24,32
小工业	1-4,6-8,18-19,21		

### 3.1 主动配电网重构

改进模型中的33号节点为变电站节点,系统有功负荷总量为3.715 MW,无功负荷总量为2.3 Mvar,重构后的节点配电网如图3所示。

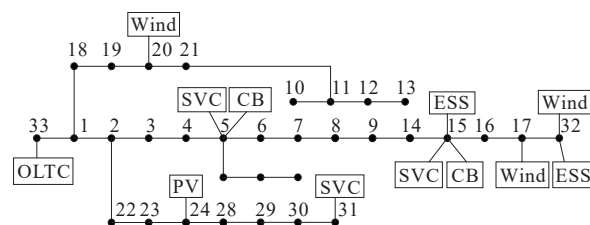


图3 重构后的33节点配电网

Figure 3 The reconstructed 33-node distribution network

从图3中可以看出,重构后的配电网断开了支路9-10、13-14、27-28、31-32和7-20,每条支路装设的均为分段开关。在此基础上,分别利用遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)与Gurobi求解器计算,得到优化结果见表2。

表2 主动配电网重构优化结果

Table 2 Optimization results of reconstructed active distribution network

模型类别	计算时间/s	网损值/ MW	降损率/ %	最低节点电 压标么值	开关 次数
原系统	6.13	0.211	—	0.915	0
最优潮流	81.46	0.176	16.59	0.931	0
GA	27.13	0.142	32.70	0.934	10
PSO	25.98	0.118	44.08	0.937	10
Gurobi	10.19	0.097	54.03	0.944	8

由表2可知,在配电网中加入DG会降低系统网络损耗,但其降幅较小,故对其进行重构处理。从这3种方案的重构效果的对比中可知,这3种算法都在不同程度上提高了模型求解效率,减小了系统有功网损与提高了整体电压水平。其中,Gurobi提升效果最显著,模型求解时间从最优潮流算法的81.46 s减少到10.19 s,缩短了87.49%;系统期望网损

值从最优潮流算法的 0.176 MW 减少到 0.097 MW, 降低了 44.89%;系统最小电压标幺值从最优潮流算法的 0.931 提高到 0.944,增加了 1.40 %。此外,相比 GA 和 PSO,Gurobi 在模型求解速度上分别缩减了 16.94、15.79 s,网损进一步分别降低了 0.045、0.021 MW,最小电压标幺值分别上升了 0.010、0.007,且该算法的开关操作次数比遗传算法和粒子群算法的减少了 2 次,提高了系统长时间运行的稳定性。配电网重构前、后的电压分布如图 4 所示。

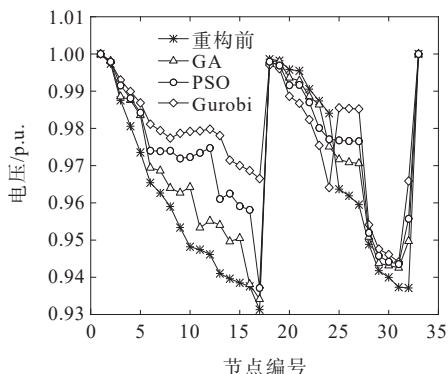


图 4 配电网重构前、后电压分布

Figure 4 Voltage distribution diagram before and after reconstructed distribution network

从图 4 中可以看出,在计及主动管理设备的配电网重构中,在不增加设备投资的情况下,改变一个或多个开关的状态,能提升系统负荷高峰期的整体电压水平,有效降低负荷峰谷差。主动管理设备可在负荷高峰期通过动态分配负荷,将部分即将超出限值的高负荷节点的负荷转移到低负荷节点上,保证了系统运行的经济性与安全性。

### 3.2 最优潮流下的有功—无功协调优化

根据基础网络数据进行动态最优潮流计算,得出各主动管理设备及负荷需求在不同时段的变化情况。各时段内的节点电压分布如图 5 所示。在图 5 中,各节点负荷类型均保持不变。

从图 5 中可以看出,在负荷高峰时段内,电力系统总负荷较大,部分节点电压标幺值下降。这是因为负荷和电流的增加引起了支路阻抗波动,影响到电压稳定性;而在负荷低谷期,由于系统总负荷较小,电流需求减少,故系统电压维持在较高水平并能稳定运行。各时段内负荷有功与无功需求分别如图 6、7 所示。

从图 6、7 中可以看出,加入储能装置和无功补

偿设备后的改善效果显著,配电网的有功波动幅度显著降低。这使得配电网的有功能更平滑、稳定地输出,实现电力系统有功负荷的最优分配;相应的无功也保持在平衡状态,能有效降低变压器及线路损耗,改善供电环境。各时段内光伏风机出力与储能装置充、放电功率分别如图 8、9 所示。在图 8 中, Wind1、Wind2、Wind3 分别对应节点 20、32 和 17 接入的分布式风电出力。在图 9 中,ESS1 和 ESS2 为节点 15 和 32 接入的储能系统。

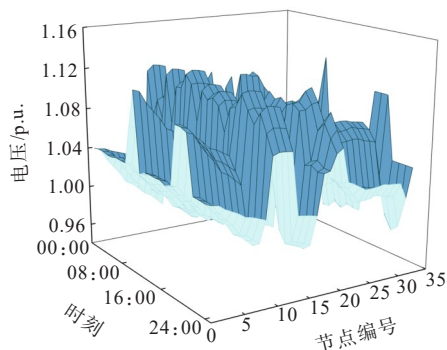


图 5 最优潮流下的节点电压分布

Figure 5 Distribution diagram of node voltage under optimal power flow

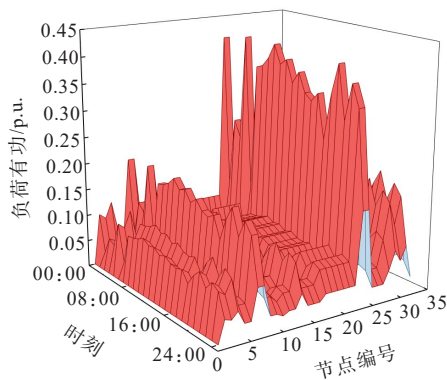


图 6 有功负荷曲面

Figure 6 Surface plot of active power loads

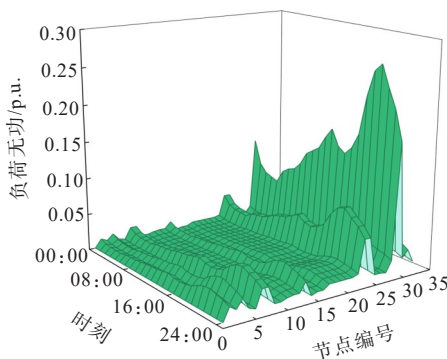


图 7 无功负荷曲面

Figure 7 Surface plot of reactive power loads

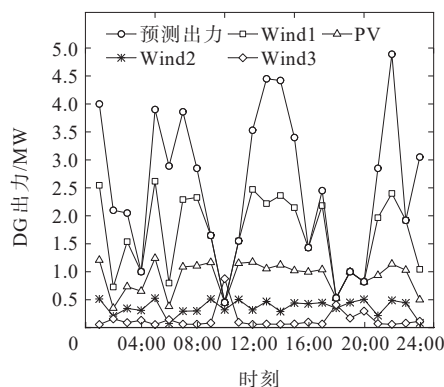


图8 风机/光伏实际出力曲线

Figure 8 Actual output power curves of wind turbine/photovoltaic

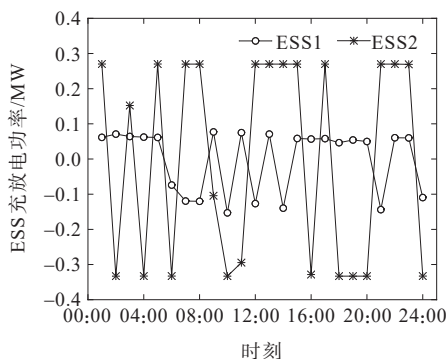


图9 ESS充放电功率曲线

Figure 9 Charge and discharge power curves of ESS

从图9中可以看出,在负荷低谷期(00:00—11:00),由于ESS装置受到容量的约束,难以吸收更多的可再生能源,故不可避免地会发生弃电现象;而在夜间,DG出力占比较高,此时无功补偿装置将系统多余的无功转化为有功或其他形式的电能进行储存,避免了电压越限。在负荷高峰期(13:00—22:00),ESS装置能够将储存的电量释放出来,降低了等效负荷的峰谷差。

该模型的目标函数要求网络损耗和主网购电量综合最小。因此,当购电量保持相当时,网络损耗降低会导致相应的弃风弃光量增加,这说明过多接入DG会增加配网运行经济负担。动态最优潮流模型可实时监控配网运行状况,协调控制DG以及无功补偿装置出力,有效减小系统网络损耗,提高配网运行的经济性。各时段无功补偿量如图10所示。在图10中,SVC1、SVC2、SVC3分别对应节点5、31和15接入的无功补偿装置,CB1和CB2对应节点5、15接入的电容组。

从图10中可以看出,在优化过程中,为避免DG出力占比过大,模型对其出力进行了削减,CB和

SVC装置的无功补偿量也随之改变。由于动态最优潮流模型中系统部分节点电压标幺值超过了1.0,为避免发生电压越限现象,增加无功补偿装置以保障电力系统的稳定运行。此外,SVC和CB可根据光伏和风电有功出力的变化,不断修正自身的无功出力,使系统时刻处于近似优化状态,增强了系统运行的协调能力,减少系统网络损耗,大幅改善大功率DG接入引起的谐波问题。

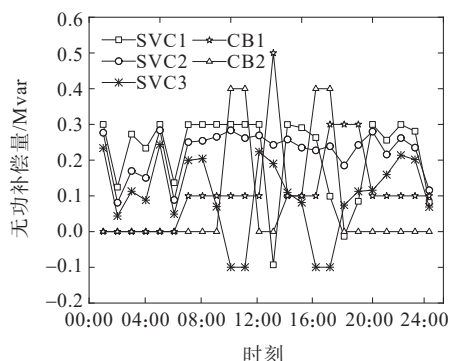


图10 静止无功补偿器出力曲线

Figure 10 Output curves of static var compensator

## 4 结语

基于动态最优潮流,构建了考虑无功补偿装置、分布式电源及储能装置运行约束在内的配电网动态重构模型,通过二阶锥松弛将其转化为混合整数二阶锥问题。研究表明:

1) 所提出的动态配电网重构优化模型能有效提高配电网运行稳定性。其中,系统期望网损降低了44.89%,整体电压水平提高了1.40%;

2) 与粒子群和遗传算法结果对比分析发现:Gurobi算法在求解速度上分别提高了19.38%和20.79%,有功损耗分别降低了11.95%和25.57%;

3) 含主动管理设备在内的配电网可有效应对DG的波动性和随机性,可满足不同时段内的负荷需求,达到削峰填谷的目的。

本文通过应用实例分析,验证了基于二阶锥最优潮流下的重构模型可在主动配电网准实时运行领域满足准确性要求,从应用角度验证了模型的有效性。在主动配电网控制与日前调度等问题上使模型具有更好的高效性和稳定性是下一步的工作方向。

## 参考文献:

- [1] 张辰琪,朱成昊,李洋,等.基于随机模糊潮流的三相不平衡配电网节能降损方法[J].电力科学与技术学报,

- 2022,37(6):212-218.  
ZHANG Chenqi,ZHU Chenghao,LI Yang, et al. Research on energy saving and loss reduction method of three-phase unbalanced power grid based on stochastic fuzzy power flow[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(6):212-218.
- [2] 王守相,李琦,赵倩宇,等.计及源荷随机性的交直流配电网电压多目标优化改进粒子群算法[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(12):10-17.  
WANG Shouxiang,LI Qi,ZHAO Qianyu, et al. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective voltage optimization of AC/DC distribution network considering the randomness of source and loads [J]. Proceedings of the CSU-EPSS,2021,33(12):10-17.
- [3] 黄铭浩,陈一丰,董树锋.基于安德森加速的输配协同低碳最优潮流[J].电网技术,2023,47(8):3132-3144.  
HUANG Minghao,CHEN Yifeng,DONG Shufeng. Low-carbon optimal power flow of transmission-distribution-coupled networks based on Anderson acceleration[J]. Power System Technology,2023,47(8):3132-3144.
- [4] 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.
- [5] KONG P C, AI Y L. Distribution network reconstruction with DG based on improved sparrow search algorithm[J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science,2023,6(4):1-10.
- [6] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification: Part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):2554-2564.
- [7] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification: Part II[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):2565-2572.
- [8] 廖小兵,周自强,乐健,等.考虑电池储能老化和需求侧响应的交直流混合配电网动态重构方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):43-54.  
LIAO Xiaobing,ZHOU Ziqiang,LE Jian, et al. Dynamic reconfiguration of an AC/DC hybrid distribution network considering battery energy storage aging and demand response[J]. Power System Protection and Control,2023,51(14):43-54.
- [9] 马智刚,卫志农,陈胜,等.基于图计算的交直流混合配电网优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(18):161-170.  
MA Zhigang,WEI Zhinong,CHEN Sheng, et al. Optimal dispatch of AC/DC hybrid distribution network based on graph computing[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(18):161-170.
- [10] 张忠会,雷大勇,蒋昌辉,等.基于二阶锥规划和NNC法的交直流混合配电网双层规划模型及其求解方法[J].中国电机工程学报,2023,43(1):70-85.  
ZHANG Zhonghui,LEI Dayong,JIANG Changhui, et al. A bi-level planning model and its solution method of AC/DC hybrid distribution network based on second-order cone programming and NNC method[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(1):70-85.
- [11] 彭月,熊炜,袁旭峰,等.基于混合整数二阶锥规划的主动配电网最优潮流研究[J].电测与仪表,2023,60(5):139-144.  
PENG Yue,XIONG Wei,YUAN Xufeng, et al. Research on optimal power flow of active distribution network based on mixed integer second-order cone programming [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60 (5):139-144.
- [12] 郝文斌,孟志高,张勇,等.新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):23-33.  
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control,2023,51(14):23-33.
- [13] SHI Q X, LI F X, OLAMA M, et al. Network reconfiguration and distributed energy resource scheduling for improved distribution system resilience [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2021,124:106355.
- [14] 李小文,安义,刘娟,等.基于启发式规则与改进和声算法的配网快速故障恢复网络重构[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):91-99.  
LI Xiaowen, AN Yi, LIU Juan, et al. Fast service restoration of distribution network based on combination of heuristic rules and improved harmony search algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(4):91-99.
- [15] 石铨,安锐,高红均,等.基于柔性多状态开关和动态重构的配电网灵活运行方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(22):133-144.  
SHI Cheng, AN Rui, GAO Hongjun, et al. Flexible operation method for a distribution network based on flexible multi-state switching and dynamic reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(22):133-144.
- [16] 汪倩,陈思磊,孟羽,等.低压直流系统故障电弧检测技术研究综述[J].高压电器,2023,59(5):93-103.  
WANG Qian, CHEN Silei, MENG Yu, et al. Review of research on DC arc fault detection technology in low voltage DC system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (5):93-103.



- [17] SHENG W X, LIU K Y, LI Z, et al. Collaborative fault recovery and network reconstruction method for cyber-physical-systems based on double layer optimization[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(1): 380-392.
- [18] 黄鸣宇, 张庆平, 张沈习, 等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 116-123.  
HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 116-123.
- [19] 孙伟卿, 刘唯, 张婕. 高比例可再生能源背景下配电网动态重构与移动储能协同优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 80-90.  
SUN Weiqing, LIU Wei, ZHANG Jie. Collaborative optimization for dynamic reconfiguration of distribution network and mobile energy storage in background of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 80-90.
- [20] 章博, 刘晟源, 林振智, 等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 86-94.  
ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 86-94.
- [21] 潘本仁, 王和春, 张妍, 等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.  
PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.
- [22] 徐振东, 张晓, 徐波, 等. 计及智能储能软开关的配电网扩展规划[J]. 智慧电力, 2022, 50(5): 48-55.  
XU Zhendong, ZHANG Xiao, XU Bo, et al. Planning of distribution network expansion considering SOP integrated with ESS[J]. Smart Power, 2022, 50(5): 48-55.
- [23] 魏妍萍, 王军, 李南帆. 可再生能源接入对电网电能质量的影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 108-114.  
WEI Yanping, WANG Jun, LI Nanfan. An analysis of the influence of grid-connected renewable energy on power quality of power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 108-114.
- [24] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1645.  
GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.
- [25] 刘杨华, 杨悦荣, 林舜江. 含光伏配电网中储能和无功补偿装置协调的多目标凸优化配置方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 22-33.  
LIU Yanghua, YANG Yuerong, LIN Shunjiang. A multi-object convex optimization method for the coordinated allocation of energy storage and reactive power compensation devices in distribution network integrated with photovoltaics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 22-33.
- [26] 谢仕炜, 胡志坚, 王珏莹, 等. 基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1038-1054.  
XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying, et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1038-1054.
- [27] 程杉, 钟仕凌, 尚冬冬, 等. 考虑电动汽车时空负荷分布特性的主动配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 1-13.  
CHENG Shan, ZHONG Shiling, SHANG Dongdong, et al. Dynamic reconfiguration of an active distribution network considering temporal and spatial load distribution characteristics of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 1-13.
- [28] 陈倩, 王维庆, 王海云. 基于需求侧响应的主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 1-13.  
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimization model of an active distribution network based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 1-13.
- [29] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [30] 赵平, 赵期期, 艾小猛. 考虑极限场景的主动配电网重构与无功电压调整联合鲁棒优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊2): 496-506.  
ZHAO Ping, ZHAO Qiqi, AI Xiaomeng. Joint robust optimization of active distribution network reconfiguration and reactive power and voltage adjustment considering limit scenarios[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Sup 2): 496-506.
- [31] 葛鹏江, 张树永, 董晓晶, 等. 基于鲁棒优化的配网重构二阶锥规划模型[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 50-57.  
GE Pengjiang, ZHANG Shuyong, DONG Xiaojing, et al. Distribution network reconfiguration model based on robust optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 50-57.