

# 基于配网规划等值曲线的输配电网协调规划

王明渊<sup>1</sup>, 何凯<sup>2</sup>, 王木<sup>2</sup>

(1. 国家电网有限公司, 北京 100031; 2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084)

**摘要:** 输电网与配电网规划问题均是电力系统规划中的经典问题, 而将二者协同考虑能够在投资预算总额固定的情况下获得整体更优的规划方案。为解决输配电网协调规划组合爆炸、求解困难的问题, 提出基于配网规划等值曲线的输配电网分层协调规划方法。各配电网分别求解不同新增项目数量下的最优规划方案和最大净收益, 得到配网规划等值曲线; 将其嵌入输电网规划模型的目标函数即可得到输配电网协调规划方案。该方法可以减少模型中的决策变量数量, 提升求解效率。基于 Garver's 6 节点输电系统和 REDS-135 节点配电系统构造的输配电网规划算例验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 电网规划; 输配电系统; 分层协调规划; 配网规划等值曲线

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.005      中图分类号: TM715      文章编号: 1673-9140(2022)06-0046-09

## Coordinated transmission & distribution network expansion planning based on project-net revenue curve of distribution network

WANG Mingyuan<sup>1</sup>, HE Kai<sup>2</sup>, WANG Mu<sup>2</sup>

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Transmission network planning and distribution network planning are all classical problems in power system. The coordination programming of these networks will lead to global optimal planning solution with the premise of a prescribed investment budget. In order to tackle the issue of combinatorial explosion in the coordinated planning, a bi-level calculation method based on the project-net revenue curve of distribution network is proposed. By solving the distribution network planning model repeatedly, project-net revenue curve is obtained and passed to the transmission network expansion model. This method significantly reduces the number of integer variables in the coordinated planning problem. In case studies, transmission & distribution testbed based on the modified Garver's 6-bus system and the REDS-135 system verifies the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** power network planning; transmission-distribution system; hierarchical coordinated planning; project-net revenue curve of distribution network planning

中国经济社会的快速发展、工业化和城镇化进行加速、煤改电等项目的实施、以及电动汽车充电需

求的增加, 使得电力负荷需求、特别是城镇和工业园区电力负荷持续增长, 这对输电网和配电网传输能

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-09-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51537005)

通信作者: 王木(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统、电力市场方面研究; E-mail: w1272919880@163.com

力提出了新的要求。基于美国和欧洲电网的实证研究指出,电网容量不足引起的停电损失超过冗余线路的投资成本<sup>[1]</sup>。为此,需要适度超前开展输配电网规划和建设,以提升电网输电能力、保障电力安全供应、适应中国经济社会发展的需求。

输电网和配电网运行特点不同,规划的模型和方法也有差异,目前已有众多文献分别对输电网和配电网的规划方法进行了研究。在输电网规划领域,文献[2]首次使用线性规划对输电网扩展进行评估;文献[3]提出了以最小化投资费用和可靠性指标的输电网规划模型,从规划阶段降低系统大停电的风险水平;文献[4]提出了考虑新能源不确定性和随机性的电网规划方法;文献[5]提出了一种将可靠性指标转化为经济性指标的电网规划新方法;文献[6]提出了市场环境下的发输电一体扩展规划模型;文献[7]提出了一个以概率模型解决多目标电源电网协调规划模型的不确定性的方法;文献[8]给出了基于可靠性的电源电网扩展规划模型和方法;文献[9]提出了一种适应节能服务环境的电网综合资源规划新方法。在配电网规划方面,早期的配电网规划模型包括变电站规划模型、网架规划模型、变电站—网架联合规划模型以及多阶段规划模型<sup>[10]</sup>。文献[11]基于变电站规划模型,在电源点、负荷点的基础上考虑了既接受电能又输出电能的传输节点;文献[12]将整个规划范围用地理信息系统网络的坐标系标识,并以此为基础使用动态规划方法规划馈线路径;文献[13]分析了分布式电源在配电网中的布点规划和考虑分布式电源的配电网扩展规划问题;文献[14]提出一种配电网扩展规划中进行分布式电源选址和定容的方法;文献[15-16]提出考虑电动汽车充电网络的配电网规划模型。

相比于独立规划,输电网与配电网协同规划更具优越性。在物理层面,配电网中新增负荷项目和扩容项目会增加输电网的净负荷,输电网规划中对配网内部新增负荷特性和配网运行特性考虑不足,得到的规划方案可能导致输电网与配电网发展不均衡,进而引起局部阻塞或输电网投资过剩。在经济层面,配电网新增项目会影响输电网净负荷与输电线路规划,新增输电线路可能影响配电网并网节点的电价进而影响配电网扩建的净收益,电网规划

中缺乏对输配电网交互影响的考虑将无法实现全社会福利的最大化。在输配电网协同规划方面,文献[17]针对多电压等级、不同网络结构的输配电系统的综合规划问题进行了研究,提出了开环与非开环混合的输配电系统综合规划问题的近似解决方法;文献[18]对110 kV变电站选址定容及供电范围进行了划分,通过提高片区内所有同级变电站的运行合理性,达到优化输电网与配电网间衔接的目的;文献[19]提出了构建输配电网协调规划模型的技术路线,并提出采用现代启发式优化算法和原始对偶内点法相结合的方法求解规划模型。现有输配电网协调规划的研究通常将配电网规划模型整体纳入输电网规划模型统一建模,或者采用输配电网通过公共连接点迭代协同的方法<sup>[20-21]</sup>。然而,传统的集中式求解方法在求解较大规模的输配电网协调规划问题时,模型复杂度高、求解效率低,在实际工程应用中面临挑战。

为此,本文提出一种输配电网分层规划的新模式,建立基于配网规划等值曲线的输配电网双层规划模型。其中,配电网以扩建净成本最小为目标,采用DistFlow潮流方程建立规划模型。然后在配电网不同项目总数下,分别优化计算得到对应的配网净收益和配网新增负荷,作为输电网规划模型的输入参数。输电网以考虑各配网规划等值曲线的扩建成本最小为目标,采用直流潮流方程建立规划模型。通过输电网模型的优化计算确定输电网线路的规划方案以及各配网内的项目决策方案。算例分析验证本文所提方法的有效性。

## 1 输配电网协调规划模式

当前,电网公司在开展配电网规划时需要考虑配电网终端用户未来的发展情况,而在各年度投资预算有限的背景下,电网企业不可能同时满足所有配网扩建诉求,只能优先满足净收益大的配网规划项目。因此,需要协调考虑配网发展决策的经济效益以及输、配电网的扩建成本,以最大化电网扩建净收益为目标,优化决策未来的输电网和配电网规划方案。本文对上述需求建立输、配电网联合规划模型。

1) 目标函数:最大化电网扩建净收益。其中,电

网扩建净收益=配网新增项目经济效益-(输电网扩建成本+配网扩建成本)。

2)约束条件:输配电网扩建总投资预算以及输电网、各个配网的运行约束。

3)决策变量:表征输电网、各个配网的待选线路投建与否的0/1变量以及各个配网待新增负荷项目(如工业园区、煤改电项目)投建与否的0/1变量。

然而,上述联合优化模型是一个复杂的混合整数二次规划模型,决策变量多,存在“组合爆炸”的问题,难以直接一体化求解。为了实现输配电网联合规划问题的高效求解,本文提出基于配电网规划等值曲线的双层优化求解框架,如图1所示,包括上层输电网和下层配电网规划模型,二者之间通过配电网规划等值曲线相关联。

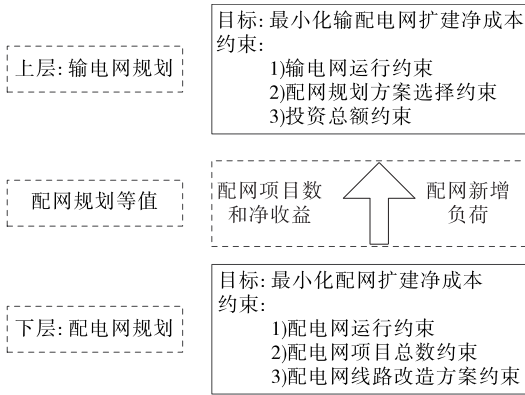


图1 输配电网协调规划框架

Figure 1 Bi-level calculation framework for coordinated transmission and distribution network planning

下层模型中各配电网分别优化计算不同投建项目数量下的配电网最大净收益,生成配网规划等值曲线;上层模型考虑配网规划等值曲线优化决策输电线路投建和各配电网新建项目数量,得到输配网协调规划方案。配网规划等值曲线反映了配网内不同新增项目数量下的最优扩建方案和扩建收益,配网新增项目决策会影响输电网规划,而输电网规划时从整体优化的角度对配网规划的初步结果进行优化筛选,由此兼顾了配网规划的局部最优以及输电网规划的全局最优。

基于输配电网分层建模的思路,在配电网与输电网连接的公共节点处将输电网和配电网进行等效分离:对输电网而言,配电网在公共节点处等效为净负荷;对配电网而言,输电网在公共节点处等效为虚

拟的发电机。相较于集中式方法,所提出的双层求解框架将含有多配网的输配电网联合规划问题分散至输电网和各配电网单独求解,过程中无需输电网与配电网双方互相知晓对方网络的网架结构参数,将联合规划问题的计算难度由指数复杂度降低为代数复杂度,可实现模型的高效求解。

## 2 基于配网规划等值曲线的输配电网协调规划模型

在提出的输配电网协调规划模式基础上,结合电网规划的实际需求建立基于配网规划等值曲线的输配电网协调规划数学模型。

### 2.1 配电网规划模型

假设配电网中待选项目集合为 $\Omega$ ,各个项目对应的负荷曲线为 $L_{p,t}^p$ , $p \in \Omega, t = 1, 2, \dots, T$ ,其中, $T$ 表征负荷预测周期(电网规划周期)对应的时段数,假设负荷预测周期为5 a,1个时段取1 h,则 $T$ 为43 800 h。表征各项目投建与否的0/1决策变量为 $\alpha_p$ ;假设配电网备选(待新建或改造)线路集合为 $K^p$ ;各线路对应的投资成本为 $c_k$ , $k \in K^p$ ;各线路对应的投建与否的0/1决策变量为 $u_k$ 。

#### 2.1.1 目标函数

配电网规划目标函数为

$$\min C_x^{\text{Inv}} - C_x^{\text{Rev}} + \sum_{t=1}^T \pi_t^b \cdot P_{x,t}^V \quad (1)$$

$$C_x^{\text{Inv}} = \sum_{k \in K^p} c_k \cdot u_k \quad (2)$$

$$C_x^{\text{Rev}} = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{p \in \Omega} (\pi_t^s - \pi_t^b) \cdot L_{p,t}^p \cdot \alpha_p \right) \quad (3)$$

式(1)~(3)中 $x$ 为公共节点; $C_x^{\text{Inv}}$ 为随之产生的线路投建所带来的成本; $C_x^{\text{Rev}}$ 为新增项目负荷给 $x$ 对应配电网带来的售电净收益; $\pi_t^s$ 为配电网第 $t$ 时段的销售电价; $\pi_t^b$ 为配电网第 $t$ 时段向输电网购电的电价; $P_{x,t}^V$ 为配电网与输电网的公共节点 $x$ 第 $t$ 时段虚拟机组出力; $\pi_t^b \cdot P_{x,t}^V$ 为配电网第 $t$ 时段为满足负荷需求而向输电网购电付出的成本; $T$ 为负荷预测周期(电网规划周期)对应的时段数。式(1)表示综合考虑配网扩建成本和售电收入的净成本最小。

#### 2.1.2 约束条件

1)线路潮流和电流上下限约束。

对于已有线路:

$$-P_k^{\max} \leq P_{k,t} \leq P_k^{\max}, \forall t, k \in K^E \quad (4)$$

$$-Q_k^{\max} \leq Q_{k,t} \leq Q_k^{\max}, \forall t, k \in K^E \quad (5)$$

$$0 \leq I_{k,t}^2 \leq I_{k,\max}^2, \forall t, k \in K^E \quad (6)$$

式(4)~(6)中  $K^E$  为已有线路集合;  $P_{k,t}$ 、 $Q_{k,t}$ 、 $I_{k,t}^2$  分别为第  $k$  条线路第  $t$  时段有功潮流、无功潮流、电流平方;  $P_k^{\max}$ 、 $Q_k^{\max}$ 、 $I_{k,\max}^2$  分别为三者对应上限。

对于新建或改造线路:

$$-u_k P_k^{\max} \leq P_{k,t} \leq u_k P_k^{\max}, \forall t, k \in K^P \quad (7)$$

$$-u_k Q_k^{\max} \leq Q_{k,t} \leq u_k Q_k^{\max}, \forall t, k \in K^P \quad (8)$$

$$0 \leq I_{k,t}^2 \leq u_k I_{k,\max}^2, \forall t, k \in K^P \quad (9)$$

2) Dist-Flow 潮流约束。

① 等式约束。

针对已有线路:

$$V_{S(k),t}^2 - V_{R(k),t}^2 - 2r_k P_{k,t} - 2x_k Q_{k,t} + (r_k^2 + x_k^2) I_{k,t}^2 = 0, \forall t, k \in K^E \quad (10)$$

针对新建或改造线路:

$$V_{S(k),t}^2 - V_{R(k),t}^2 - 2r_k P_{k,t} - 2x_k Q_{k,t} + (r_k^2 + x_k^2) I_{k,t}^2 - u_k M_0 \geq M_0, \forall t, k \in K^P \quad (11)$$

$$V_{S(k),t}^2 - V_{R(k),t}^2 - 2r_k P_{k,t} - 2x_k Q_{k,t} + (r_k^2 + x_k^2) I_{k,t}^2 + u_k M_0 \leq M_0, \forall t, k \in K^P \quad (12)$$

式(11)、(12)中  $V_{S(k),t}^2$ 、 $V_{R(k),t}^2$  分别为第  $k$  条线路首端、末端节点  $t$  时段的电压平方;  $r_k$ 、 $x_k$  分别为第  $k$  条线路的电阻、电抗;  $M_0$  为一个的大数。

② SOC 不等式约束。

$$P_{k,t}^2 + Q_{k,t}^2 - I_{k,t}^2 V_{S(k),t}^2 \leq 0, \forall t, k \in K^E \cup K^P \quad (13)$$

3) 节点功率平衡约束。

① 对于与主网连接的公共节点  $x$ 。

$$P_{x,t}^V - \sum_{k|S(k)=x} P_{k,t} = 0, \forall t \quad (14)$$

$$Q_{x,t}^V - \sum_{k|S(k)=x} Q_{k,t} = 0, \forall t \quad (15)$$

式中  $Q_{x,t}^V$  为与主网公共节点  $x$  处第  $t$  时段的虚拟机组无功出力。

② 对于配网其他节点。

$$- \sum_{k|S(k)=i} P_{k,t} + \sum_{k|R(k)=i} (P_{k,t} - r_k I_{k,t}^2) - \sum_{p \in \Omega_i} \alpha_p L_{p,t}^Q = P_{i,t}^D, \forall t, i \in N/x \quad (16)$$

$$- \sum_{k|S(k)=i} Q_{k,t} + \sum_{k|R(k)=i} (Q_{k,t} - x_k I_{k,t}^2) - \sum_{p \in \Omega_i} \alpha_p L_{p,t}^Q = Q_{i,t}^D, \forall t, i \in N/x \quad (17)$$

式(16)、(17)中  $N$  为配网所有节点集合;  $L_{p,t}^Q$  为第  $p$  个项目第  $t$  时段的无功负荷;  $P_{i,t}^D$  为节点  $i$  处第  $t$  时段的已有固定有功负荷;  $Q_{i,t}^D$  为节点  $i$  处第  $t$  时段已有固定无功负荷。

4) 公共节点虚拟电源出力控制。

$$0 \leq P_{x,t}^V \leq P_{x,\max}^V, \forall t \quad (18)$$

$$0 \leq Q_{x,t}^V \leq Q_{x,\max}^V, \forall t \quad (19)$$

式(18)、(19)中  $P_{x,\min}^V$  为公共节点  $x$  (根节点) 虚拟有功出力上限;  $Q_{x,\max}^V$  为虚拟无功出力上限。

5) 节点电压幅值。

$$V_{x,t}^2 = V_{x,t}^{\text{set}}, \forall t \quad (20)$$

$$V_{i,\min}^2 \leq V_{i,t}^2 \leq V_{i,\max}^2, \forall t, i \in N/x \quad (21)$$

式(20)、(21)中  $V_{x,t}^{\text{set}}$  为根节点第  $t$  时段给定电压幅值平方;  $V_{i,t}^2$  为节点  $i$  第  $t$  时段的电压幅值平方;  $V_{i,\max}^2$ 、 $V_{i,\min}^2$  分别为节点  $i$  电压幅值平方上、下限。

6) 配电网项目总数控制。

$$\sum_{p \in \Omega} \alpha_p = m \quad (22)$$

式中  $m$  为配网新增的项目个数。

## 2.2 配网规划等值曲线

为解决配电网—输电网协同规划时出现的组合爆炸问题,提出配网规划等值曲线的概念和方法,具体方法说明如下。

将新增的配网项目个数  $m$  设为不同的值,依次优化计算上述配网规划模型,得到配网项目和线路的扩展方案以及对应的优化结果都是  $m$  的函数:各个时段从公共节点  $x$  的购电,即虚拟电源出力  $P_{x,t}^V(m)$ ,  $t=1,2,\dots,T$ 、配网净收益  $C^{\text{Rev,Net}}(m) = C_x^{\text{Rev}}(m) - C_x^{\text{Inv}}(m)$ 。

考察每个输电网节点  $x$ ,  $x \in N$  对应的配电网,令  $m=0,1,\dots,M_x$ ,依次优化计算得到对应配网的净收益曲线  $(C_x^{\text{Rev,Net}}(0), C_x^{\text{Rev,Net}}(1), \dots, C_x^{\text{Rev,Net}}(M_x))$ ,以及配网不同时段向主网的购电曲线  $(P_{x,t}^V(0), P_{x,t}^V(1), \dots, P^V(x,t)(M_x))$ ,  $t=1,2,\dots,T$ ,即主网  $x$  节点对应的负荷曲线  $(P_{x,t,0}^{\text{LD}}, P_{x,t,1}^{\text{LD}}, \dots, P_{x,t,M_x}^{\text{LD}})$ ,  $t=1,2,\dots,T$ 。节点固有负荷即为  $P_{x,t,0}^{\text{LD}}$ ,则新增项目负荷曲线为  $(0, P_{x,t,1}^{\text{LD}} -$



$P_{x,t,0}^{\text{LD}}, \dots, P_{x,t,M_x}^{\text{LD}} - P_{x,t,0}^{\text{LD}}, t=1, 2, \dots, T$ 。此处不妨令新增项目总数为  $m$  时, 新增负荷为  $\Delta P_{x,t,m} = P_{x,t,m}^{\text{LD}} - P_{x,t,0}^{\text{LD}}$ 。

本文将配网项目数与相应配网净收益(配网售电收益减去配网新建线路投资)的关系曲线称为配网规划等值曲线, 这是因为在设计输配协调规划模式下, 本文将作为后续输电网规划模型的输入参数。从输电网的角度来看, 输电网规划更关心配网整体的新增负荷、投资和收益情况, 并不关注配网中具体项目的组合情况, 因此, 本文采用配网规划等值方法能够减少输电网规划模型决策变量的规模, 从而提升模型的求解效率。

## 2.3 输电网规划模型

### 2.3.1 目标函数

输电网规划的目标函数为综合考虑配网投资净收益和输电网投资成本的净成本最小(输配电网扩展总成本最小), 即

$$\min - \sum_{x \in \Omega^{\text{N}}} \sum_{m=1}^{M_x} (C_{x,m}^{\text{Rev}} - C_{x,m}^{\text{Inv}}) \cdot \beta_{x,m} + \sum_{k \in \Omega^{\text{PLN}}} c_k^{\text{LN}} \cdot u_k^{\text{LN}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{G}}} \sum_t c_i^{\text{G}} \cdot P_{i,t}^{\text{G}} \quad (23)$$

式中  $\Omega^{\text{N}}$  为输电网节点(包含配网)集合;  $M_x$  为节点  $x$  对应配网的项目数;  $\beta_{x,m}$  为 0-1 变量, 表示选择节点  $x$  对应的配网投资  $m$  个项目;  $u_k^{\text{LN}}$  为线路方案  $k$  是否投建的 0-1 变量;  $c_k^{\text{LN}}$  为主网备选线路  $k$  的投建成本;  $\Omega^{\text{G}}$  为输电网的机组集合;  $P_{i,t}^{\text{G}}$  为机组  $i$  第  $t$  时段的出力;  $c_i^{\text{G}}$  为机组出力成本。  $\sum_{i \in \Omega^{\text{G}}} \sum_t c_i^{\text{G}} \cdot P_{i,t}^{\text{G}}$  表示输电网所有机组的发电成本, 该项在前两项优化的基础上进一步考虑降低机组出力成本, 同时抑制出力波动。

### 2.3.2 约束条件

1) 功率平衡约束。

$$\sum_{i \in \Omega^{\text{G}}} P_{i,t}^{\text{G}} - \sum_{k|S(k)=x} P_{k,t}^{\text{LN}} + \sum_{k|R(k)=x} P_{k,t}^{\text{LN}} - \sum_{m=1}^{M_x} \Delta P_{x,t,m} \cdot \beta_{x,m} = P_{x,t,0}, \forall x, t \quad (24)$$

式中  $\sum_{m=1}^{M_x} \Delta P_{x,t,m} \cdot \beta_{x,m}$  为配电网新投资项目负荷传递至输电网形成的负荷增量;  $\Omega_x^{\text{G}}$  为第  $x$  节点上的机组集合;  $S(k)$ 、 $R(k)$  分别为第  $k$  条线路首端、末

端节点;  $P_{k,t}^{\text{LN}}$  为第  $k$  条线路上第  $t$  时段的潮流。

2) 线路潮流约束。

① 对于已有线路, 潮流方程为

$$P_{k,t}^{\text{LN}} - B_k^{\text{LN}} (\delta_{S(k),t} - \delta_{R(k),t}) = 0, \quad \forall t, k \in \Omega^{\text{ELN}} \quad (25)$$

式中  $B_k^{\text{LN}}$  为第  $k$  条原有线路的导纳;  $\delta_{S(k),t}$  为第  $k$  条原有线路首端节点第  $t$  时段的电压相角;  $\delta_{R(k),t}$  为第  $k$  条原有线路末端节点第  $t$  时段的电压相角;  $\Omega^{\text{ELN}}$  为已有线路的集合。

线路传输容量约束:

$$-P_k^{\text{LN,max}} \leq P_{k,t}^{\text{LN}} \leq P_k^{\text{LN,max}}, \quad \forall t, k \in \Omega^{\text{ELN}} \quad (26)$$

式中  $P_k^{\text{LN,max}}$  为第  $k$  条原有线路的输电功率上限。

② 对于备选线路, 潮流约束为

$$P_{k,t}^{\text{LN}} - B_k^{\text{LN}} (\delta_{S(k),t} - \delta_{R(k),t}) + (1 - u_k^{\text{LN}}) M \geq 0, \quad \forall t, k \in \Omega^{\text{PLN}} \quad (27)$$

$$P_{k,t}^{\text{LN}} - B_k^{\text{LN}} (\delta_{S(k),t} - \delta_{R(k),t}) - (1 - u_k^{\text{LN}}) M \leq 0, \quad \forall t, k \in \Omega^{\text{PLN}} \quad (28)$$

式中  $M$  为一大数, 满足  $M \geq \max(B_k^{\text{LN}} (\delta_{S(k),t,s} - \delta_{R(k),t,s}))$ ,  $\forall t, k \in \Omega^{\text{PLN}}$ 。

线路传输容量约束:

$$-u_k^{\text{LN}} P_k^{\text{LN,max}} \leq P_{k,t}^{\text{LN}} \leq u_k^{\text{LN}} P_k^{\text{LN,max}}, \quad \forall t, k \in \Omega^{\text{PLN}} \quad (29)$$

式中  $\Omega^{\text{PLN}}$  为备选线路的集合。

3) 节点电压相角及发电机出力约束。

$$\delta_x^{\min} \leq \delta_{x,t} \leq \delta_x^{\max}, \quad \forall x, t \quad (30)$$

$$P_i^{\text{G,min}} \leq P_{i,t}^{\text{G}} \leq P_i^{\text{G,max}}, \quad \forall i, t \quad (31)$$

式中  $\delta_x^{\min}$ 、 $\delta_x^{\max}$  分别为第  $x$  个节点电压相角的下限、上限;  $P_i^{\text{G,min}}$ 、 $P_i^{\text{G,max}}$  分别为第  $i$  台火电机组的最小、最大有功功率。

4) 配网投资方案总数约束。

$$\sum_{m=1}^{M_x} \beta_{x,m} \leq 1, \quad \forall x \quad (32)$$

式(32)表示输电网规划最多选择一种配网项目的组合方案。

5) 配网投资总额约束。

$$\sum_{x \in \Omega^{\text{N}}} \sum_{m=1}^{M_x} C_{x,m}^{\text{Inv}} \cdot \beta_{x,m} \leq C_{\text{total}}^{\text{Inv}} \quad (33)$$

其中,  $C_{\text{total}}^{\text{Inv}}$  为配网项目的投资总额。通过此约束即

可抑制配网项目的投资冲动。

经输电网规划模型的优化后即可确定最终的配网项目决策方案以及输电网线路的规划方案。

### 3 输配电网协调规划双层模型的求解

本文所建双层规划模型中配电网是 MIQCP 模型,输电网是 MIP 模型,均能采用商业优化求解软件如 CPLEX 进行求解,求解流程如图 2 所示。

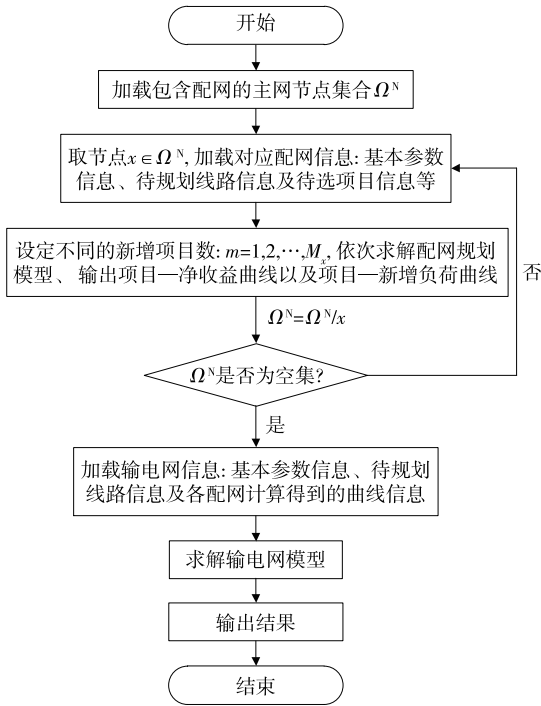


图 2 输配电网协调规划模型求解流程

Figure 2 Flow chart for solving the coordination planning model of transmission and distribution network

模型的求解步骤如下:

1) 设定输、配电网的初始拓扑结构、物理参数、负荷初值和待规划线路的物理参数和成本数据,以及配电网待规划项目的总数、拟接入点和负荷值;

2) 求解配电网规划模型,针对挂接配电网的每个输电网节点  $x$ ,分别优化计算不同配网项目总数约束下配网项目和线路的扩展决策方案,进而得到配网新增负荷  $\Delta P_{x,t,m}$ ,配网售电净收益  $C_{x,m}^{Rev}$  以及配网线路投资  $C_{x,m}^{Inv}$ ;

3) 基于配电网的优化结果,将不同配网项目数对应的配网净收益以及新增配网负荷作为输电网规划模型的输入参数;

4) 根据配电网传入参数求解输电网规划模型,得到经输电网模型筛选后的配网项目投资方案,输电网的扩展方案。

### 4 算例分析

本算例将基于标准节点系统构造输、配电网协同规划问题,并利用本文提出的双层规划模型对其进行优化分析,进一步验证本文所提规划方法的有效性和合理性。数学优化求解器采用 CPLEX 12.6。

#### 4.1 基础数据

输电网采用 Garver's 6 节点系统进行模拟,系统结构见文献[1]。系统中机组和线路的相关基本参数(线路物理参数有适当调整,线路成本已折算到日)如表 1、2 所示。

表 1 Garver's 6 节点系统中的机组参数

Table 1 Unit parameters of Garver's 6 bus system

机组编号	节点	出力上限/MW	成本/(元/(MW·h))
1	1	30	45
2	3	20	40
3	6	50	50

表 2 Garver's 6 节点系统中的线路参数

Table 2 Line parameters of Garver's 6 bus system

线路编号	起点	终点	潮流上限/MW	导纳	状态	投资成本/(元/d)
1	1	2	10	2.50	已有	—
2	1	4	8	1.67	已有	—
3	1	5	15	5.00	已有	—
4	2	3	15	5.00	已有	—
5	2	4	10	2.50	已有	—
6	2	6	10	3.33	已有	—
7	3	5	10	5.00	已有	—
8	2	6	10	3.33	备选	5 000
9	3	5	10	5.00	备选	5 000
10	4	6	15	3.33	备选	4 000
11	2	4	10	2.50	备选	6 000
12	2	6	10	3.33	备选	6 000
13	4	6	15	3.33	备选	4 000
14	4	6	15	3.33	备选	4 000

输电网第4、5节点挂接的配电网均采用REDS-135节点模型,模型结构见文献[22]。节点4对应配网将原始的REDS-135模型中的10个节点作为拟建项目节点,10条线路作为备选线路,具体信息如表3、4所示;同样地,节点5对应配网的拟建项目节点和备选线路信息如表5、6所示。

表3 节点4对应配网的拟建项目信息

Table 3 Planning project information of distribution network corresponding to node 4

拟建项目编号	对应节点	拟建项目编号	对应节点	拟建项目编号	对应节点
1	10	5	66	8	92
2	35	6	76	9	90
3	44	7	78	10	109
4	55				

表4 节点4对应配网的备选线路信息

Table 4 Candidate line information of distribution network corresponding to node 4

线路方案	起点	终点	电阻	电抗	潮流上限/MW	投资本/(元/d)
1	9	10	0.29	0.15	1.5	450
2	34	35	2.96	1.02	1.5	550
3	43	44	0.28	0.28	1.5	350
4	54	55	0.21	0.11	1.5	250
5	65	66	1.02	0.54	1.5	350
6	75	76	0.57	0.30	1.5	450
7	77	78	0.57	0.30	1.5	150
8	91	92	0.14	0.31	1.5	150
9	89	90	0.26	0.26	1.5	250
10	108	109	1.08	0.57	1.5	550
11	1	33	0.33	0.77	3.5	1 500
12	33	34	0.12	0.27	3.5	1 500

表5 节点5对应配网的拟建项目信息

Table 5 Planning project information of distribution network corresponding to node 5

拟建项目编号	对应节点	拟建项目编号	对应节点	拟建项目编号	对应节点
1	129	5	81	8	49
2	122	6	68	9	3
3	114	7	63	10	136
4	107				

表6 节点5对应配网的备选线路信息

Table 6 Candidate line information of distribution network corresponding to node 5

线路方案	起点	终点	电阻	电抗	潮流上限/MW	投资本/(元/d)
1	128	129	0.29	0.15	1.5	450
2	121	122	0.12	0.27	2.0	250
3	113	114	0.12	0.29	2.0	350
4	106	107	0.57	0.30	2.0	550
5	80	81	0.10	0.14	2.0	150
6	67	68	1.32	0.45	2.0	550
7	62	63	0.56	0.29	2.0	150
8	48	49	0.02	0.05	2.0	250
9	2	3	0.52	0.27	2.0	350
10	135	136	0.11	0.26	2.0	450
11	57	58	0.27	0.62	3.0	1 000
12	58	59	0.38	0.88	3.0	1 000

## 4.2 结果分析

### 4.2.1 配网等值规划结果

基于本文所提的配电网规划模型,将新建项目总数分别设为1,2,⋯,10,然后逐个进行优化计算,得到节点4、5对应配电网的项目—净收益关系曲线,如图3、4所示。

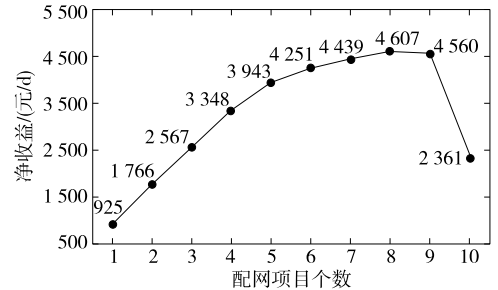


图3 节点4对应配网的规划等值曲线

Figure 3 Planning equivalent curve of distribution network corresponding to node 4

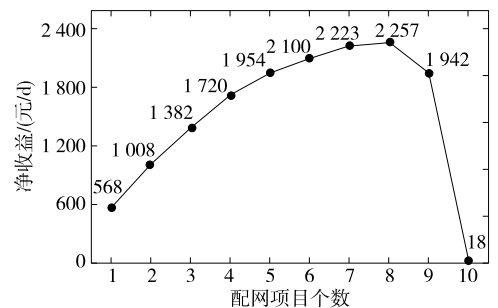


图4 节点5对应配网的规划等值曲线

Figure 4 Planning equivalent curve of distribution network corresponding to node 5

比较图 4、5 可以发现,随着配网投建项目数的增加,配网净收益呈现出先增加后减小的趋势。这是因为待规划的初始配电网通常具有一定的容量裕度,当配网投建项目较少时,新增负荷也较少,配网线路能够满足新增负荷安全传输的需求,因而无需投资新建配网线路。配网售电收益增量为(售电电价—购电电价)×配网项目负荷增量。随着项目数的增加,配网净收益(售电收益—新建线路投资成本)必然随之增加;当配网投建项目增多到一定数量时,原有配网线路将无法满足不同新增负荷安全传输的需求,此时要投资新建配网线路。从短期来看,负荷增量引起的线路投资成本大于负荷增量带来的售电收益,导致配网净收益大幅下降。

#### 4.2.2 输电网优化结果

将配电网规划模型得到的各配网新增负荷、投资和收益传递至输电网规划模型中,同时将所有配网的投资总额上限设为 4 000 元/d。通过输电网规划模型优化计算后,得到节点 4、5 对应的配网规划方案,如表 7 所示(表中“1”表示项目投建,“0”表示项目不投建)。

表 7 节点 4、5 配网拟建项目的优化结果

Table 7 Planning project optimization results of distribution network corresponding to node 4 and node 5

拟建项目 目编号	配网		拟建项目 目编号	配网	
	节点 4	节点 5		节点 4	节点 5
1	1	0	7	1	1
2	0	1	8	1	1
3	0	0	9	1	1
4	0	0	10	1	0
5	1	1	收益/(元/d)	7 031.7	3 637.7
6	1	0	投资/(元/d)	2 400.0	1 500.0

相应地,输电网线路的扩展方案为线路 10(4→6)。输电网规划模型目标函数即输、配电网每日最大综合净收益为 2 561.44 元/d。

## 5 结语

本文提出了一种输电网和配电网协调规划方法,分别基于 DistFlow、直流潮流方程建立了输电网和配电网规划模型,并通过配网规划等值曲线协调输电网和配电网规划问题,以提高输配电网联合规划的求解效率。基于 Garver's 6 节点输电系统

和 REDS-135 节点配电系统构造的输配电网协同规划算例对本文所提模型和方法进行了验证和分析。算例结果表明,所提出的配网规划等值曲线不仅能明确地表征配网投资项目数量和配网净收益的对应关系,还有助于减少输电网规划模型的变量规模,进而大大提升模型整体的求解效率。希望本文能为新电改背景下各级电网的协调规划决策提供有益参考。

#### 参考文献:

- [1] SHAHIDEHPOUR M. Investing in expansion: the many issues that cloud transmission planning[J]. IEEE Power Energy Mag, 2004, 2(1): 14-18.
- [2] GARVER L L. Transmission network estimation using linear programming[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1970, PAS-89(7): 1688-1697.
- [3] 曹一家,曹丽华,黎灿兵,等.考虑大停电风险的输电网扩展规划模型和算法[J].中国电机工程学报,2014,34(1):138-145.  
CAO Yijia, CAO Lihua, LI Canbing, et al. A model and algorithm for transmission expansion planning considering the blackout risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 138-145.
- [4] 彭波,陈旭,徐乾耀,等.面向新能源消纳的电网规划方法初探[J].电网技术,2013,37(12):3386-3391.  
PENG Bo, CHEN Xu, XU Qian Yao, et al. Preliminary research on power grid planning method aiming at accommodating new energy[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3386-3391.
- [5] 朱旭凯,刘文颖,杨以涵.综合考虑可靠性因素的电网规划新方法[J].电网技术,2004,28(21):51-54.  
ZHU Xukai, LIU Wenying, YANG Yihan. A new power network planning method by comprehensively considering system reliability factors[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 51-54.
- [6] ROH J H, SHAHIDEHPOUR M, WU L. Market-based generation and transmission planning with uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1587-1598.
- [7] 韩俊,谢珍建,黄河,等.基于停电损失计算与成本分析的配电网单元制供电网格可靠性规划[J].智慧电力,2020,48(1):63-68+117.  
HAN Jun, XIE Zhenjian, HUANG He, et al. Unit mesh reliability planning for distribution network based on outage cost calculation and cost analysis[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 63-68+117.



- [8] 杨德州,任彦辉,葛磊蛟,等.基于  $N-1$  安全约束的主动配电网拓扑优化控制方案[J].电测与仪表,2020,57(1):49-54.  
YANG Dezhou,REN Yanhui,GE Leijiao,et al.A topology optimization control scheme of active distribution network based on  $N-1$  security constraints[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2020,57(1):49-54.
- [9] 艾欣,胡寰宇,任大鹏,等.电网发展诊断的改进模糊评价模型与评级[J].中国电力,2022,55(5):66-75+165.  
AI Xin,HU Huanyu,REN Dapeng,et al.Improved fuzzy evaluation model and assessment of power grid development diagnosis[J].Electric Power,2022,55(5):66-75+165.
- [10] 李富鹏,沈秋英,王森,等.基于大数据和多因素组合分析的单元制配电网精细化负荷预测[J].智慧电力,2020,48(1):55-62.  
LI Fupeng,SHEN Qiuying,WANG Sen,et al.Refined load forecasting method for unit distribution network based on big data and multiple factors[J].Smart Power,2020,48(1):55-62.
- [11] WALL D L, THOMPSON G L, NORTHGOTTEGREEN J E D.An optimization model for planning radial distribution networks[J].IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems,1979,PAS-98(3):1061-1068.
- [12] BOULAXIS N G, PAPAPOPOULOS M P. Optimal feeder routing in distribution system planning using dynamic programming technique and GIS facilities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1): 242-247.
- [13] 据泽立,朱跃,蒲路,等.配电网电压综合补偿方法研究[J].高压电器,2020,56(4):235-240.  
JU Zeli,ZHU Yao,PU Lu,et al.Study on the voltage integrated compensation method of distribution network[J].High Voltage Apparatus,2020,56(4):235-240.
- [14] 王成山,陈恺,谢莹华,等.配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J].电力系统自动化,2006,30(3):38-43.  
WANG Chengshan,CHEN Kai,XIE Yinghua,et al.Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J].Automation of Electric Power Systems,2006,30(3):38-43.
- [15] 马文彪,程亮,陈红坤.考虑电动汽车有序充电的主动配电网网架规划[J].电力科学与技术学报,2020,35(3):85-93.  
MA Wenbiao,CHENG Liang,CHEN Hongkun.Framework planning considering coordinated charging of electric vehicles in active distribution networks[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(3):85-93.
- [16] 孔顺飞,胡志坚,谢仕炜,等.考虑分布式储能与电动汽车充电网络的配电网多目标规划[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):106-116.  
KONG Shunfei,HU Zhijian,XIE Shiwei,et al.Multi-objective planning of distribution network considering distributed energy storage and electric vehicle charging network[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(1):106-116.
- [17] 段刚,余贻鑫.输配电系统综合规划的全局优化算法[J].中国电机工程学报,2002,22(4):109-113.  
DUAN Gang,YU Yixin.Global optimization for power transmission and distribution system planning[J].Proceedings of the CSEE,2002,22(4):109-113.
- [18] 张勇军,刘瀚林,蒋金良,等.主网与配电网协调规划的评价指标和规划方法[J].电力系统自动化,2010,34(15):37-41.  
ZHANG Yongjun,LIU Hanlin,JIANG Jinliang,et al.Research on evaluation index and method of coordinated planning between main system and distribution network[J].Automation of Electric Power Systems,2010,34(15):37-41.
- [19] 金国彬,刘玉龙,李国庆,等.考虑可靠性的交直流混合配电网网架与分布式电源协同优化规划[J].电力系统保护与控制,2022,50(22):59-70.  
JIN Guobin,LIU Yulong,LI Guoqing,et al.Collaborative optimization planning of an AC/DC hybrid distribution network frame and distributed power generation considering reliability[J].Power System Protection and Control,2022,50(22):59-70.
- [20] 陈典,钟海旺,夏清.基于全成本电价的源-网-荷协同规划[J].电网技术,2017,41(9):81-87.  
CHEN Dian,ZHONG Haiwang,XIA Qing.Coordinated planning of generation-transmission-consumption based on total cost price[J].Power System Technology,2017,41(9):81-87.
- [21] WANG J,ZHONG H,TANG W,et al.Tri-level expansion planning for transmission networks and distributed energy resources considering transmission cost allocation[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(4):1844-1856.
- [22] 赵翔宇.主动配电网优化运行的模型与算法研究[D].北京:清华大学,2013.