

基于线性约束的有源配电网规划研究

邵 华, 贺春光, 安佳坤, 韩文源, 翟广心

(国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 河北 石家庄 050021)

摘 要:随着分布式电源的快速发展,配电网运行规模越来越大,运行方式多样化。传统的基于交流的非线性规划模型在计算分析方面存在许多不足。为此,提出一种基于线性约束的有源配电网规划模型。首先从潮流线性化和配电网连通性线性化 2 个方面提出配电网模型线性化的基本原理和分析方法。通过分析配电网规划目标函数和约束条件,提出配电网混合整数线性规划(MILP)模型,该模型可以通过一般的数学优化工具包进行求解。最后进行了多场景算例分析,将配电网线性化规划模型和非线性规划模型进行对比,验证了该方法的可行性和高效性,为今后配电网主动规划和主动运行一体化研究提供了新的方法。

关 键 词:配电网;协调规划;线性模型;计算效率

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.009 中图分类号:TM74 文章编号:1673-9140(2020)05-0066-09

Active distribution network planning model based on linearized constraints

SHAO Hua, HE Chunguang, AN Jiakun, HAN Wenyuan, QU Guangxin

(Economic and Technical Research Institute, State Grid Hebei Electric Power CO., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: With the rapid development of the distributed resources, the operation mode of power distribution network is becoming more and more diversified. The traditional nonlinear AC-based programming model has many lacks in the aspect of calculation. With the rapid development of the distributed resources, the operation mode of power distribution network is becoming more and more diversified. The traditional nonlinear AC-based programming model is lack in the aspect of calculation. In view of this, this paper presents an active power distribution network planning model based on linearized constraints. Firstly, the basic principle and analysis method of distribution network model linearization are presented from two aspects, the power flow linearization and the distribution network connectivity linearization. By analyzing the objective function and constraint conditions of distribution network planning, a mixed integer linear rule (MILP) model is further proposed, which can be solved by a general mathematical optimization toolkit. Finally, simulations under different conditions are carried out and the linearization planning model of distribution network are compared with the nonlinear programming model. It is shown that the proposed method is feasible and effective and a new method is provided for the future planning and operation research of the active distribution network.

Key words: distribution network; coordinated planning; linear model; computational efficiency

随着能源危机与环境污染问题的日益严重,政府加大了对可再生能源的发展力度^[1],与之密切相关的智能电网和能源互联网的建设正在如火如荼地进行^[2-3]。在能源互联网建设的过程中,最接近终端用户的配电网建设受到愈来愈多的关注^[4]。

配电网规划是根据规划期间的负荷预测和现有网络的基本状况,在满足负荷增长和安全可靠供电的前提下,确定最优的系统建设方案,使得配电网的投资建设和运行费用最小^[5-7]。近年来,配电网规划研究在模型构建和算法研究方面都取得了显著的成果^[8-10],但是,由于配电网具有线路电阻高、电压波动大等特点,在输电网规划中广泛应用的直流潮流模型并不适用于配电网^[11]。因此,在以往的研究中,针对配电网网络约束的建立往往基于交流潮流模型^[12],尚没有配电网规划模型与方法基于直流潮流的理论。然而,由于交流潮流模型的高度非线性,使得普通的数学优化工具无法求解依赖于交流潮流模型建立的配电网规划模型。针对这种情况,大多数文献选择采用遗传算法、粒子群算法等人工智能算法进行求解^[13-15],然而,人工智能算法的求解速度低下,难以满足复杂问题的求解要求^[16]。

针对未来配电网分布式电源渗透率高、运行模式多样化的特点^[17-20],研究满足精度要求的配电网线性化规划模型,将极大地提升配电网规划问题求解的效率,为配电网后续的理论研究提供进一步的基础。该文针对现有配电网规划方法的不足,对于配电网的潮流方程约束和网络连通性约束分别提出了线性化近似方法,建立了适用于有源配电网的线性化规划模型。模型的优点主要体现在:①模型考虑了配电网线路的高电阻特点,保证了计算精度;②采用线性模型描述配电网规划问题,简化了模型的复杂程度,极大地提升了模型的计算效率。对于该文提出的线性规划模型,通过仿真分析验证了配电网线性规划模型的有效性和适用性。

1 配电网基本关系的线性化处理

1.1 潮流方程线性化模型

对于 N 节点网络,电力系统分析中经典的潮流

方程可以表示为

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^N U_j (\mathbf{B}_{ij} \sin \theta_{ij} + \mathbf{G}_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (1)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^N U_j (\mathbf{G}_{ij} \sin \theta_{ij} - \mathbf{B}_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中 P_i 、 Q_i 、 U_i 和 θ_{ij} 分别表示节点 i 的有功功率注入、无功功率注入、电压幅值和电压相角, \mathbf{G}_{ij} 和 \mathbf{B}_{ij} 则是网络导纳矩阵中相应元素的电导和电纳。

以式(1)为例,基于线路电导和电纳参数,可以将其变换为

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (\mathbf{B}_{ij} \sin \theta_{ij} + \mathbf{G}_{ij} \cos \theta_{ij}) = \sum_{j=1, j \neq i}^N [g_{ij} U_i (U_i - U_j \cos \theta_{ij}) - b_{ij} U_i U_j \sin \theta_{ij}] + g_{ii} U_i^2 \quad (3)$$

式中 g_{ii} 表示节点 i 的自电导, g_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间线路的互电导, b_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间线路的互电纳。

文献[18]和文献[19]提出了如下近似方法:

$$g_{ij} U_i (U_i - U_j \cos \theta_{ij}) \approx g_{ij} (U_i - U_j) \quad (4)$$

$$b_{ij} U_i U_j \sin \theta_{ij} \approx b_{ij} \theta_{ij} = b_{ij} (\theta_i - \theta_j) \quad (5)$$

进而,式(3)可以近似为

$$P_i \approx g_{ii} U_i^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{ij} (U_i - U_j) - \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij} (\theta_i - \theta_j) = (U_i \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^N (-g_{ij} U_j)) - (\theta_i \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^N (-b_{ij} \theta_j)) = \sum_{j=1}^N \mathbf{G}_{ij} U_j - \sum_{j=1}^N \mathbf{B}'_{ij} \theta_j \quad (6)$$

需要注意的是,近似公式(6)中 \mathbf{G}_{ij} 仍然是原始网络导纳矩阵中相应元素对应的电导,但 \mathbf{B}'_{ij} 则是忽略节点接地导纳得到的电纳。

类似地,式(2)可以近似为

$$Q_i \approx - \sum_{j=1}^N \mathbf{B}_{ij} U_j - \sum_{j=1}^N \mathbf{G}_{ij} \theta_j \quad (7)$$

该文考虑配电网自身的特性,忽略节点接地阻抗,对式(6)进行改进,得到如下节点有功功率方程:

$$P_i \approx \sum_{j=1}^N G_{ij} U_j - \sum_{j=1}^N B_{ij} \theta_j \quad (8)$$

在后续的配电网规划模型的建立过程中,对于网络的潮流约束采用式(7)、(8)提出的线性化模型。

1.2 网络连通性线性化模型

对于网络的连通性,该文提出的约束方法的实现来源于网络阻抗矩阵思想:对于一个连通的电网,在其中一个节点注入单位电流,则其他节点均会产生相应的节点电压,节点电压的大小等于这2个节点之间的互阻抗大小。具体而言,对于任意一个网络,其节点电压和注入电流均满足如下关系:

$$\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{Y} \dot{\mathbf{U}} \quad (9)$$

式中 \mathbf{Y} 表示网络导纳矩阵; $\dot{\mathbf{I}}$ 和 $\dot{\mathbf{U}}$ 分别为网络节点注入电流向量和网络节点电压向量。如果设定网络中某个节点的注入电流为1,则该网络中所有节点连通等价于:对于网络中任意一个节点 i ,其电压幅值满足:

$$U_i > \varepsilon, i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

其中, ε 是充分小的正数。

因此,对于某原始电网,假设其导纳矩阵为 \mathbf{Y}_0 (对于待规划的原始电网,认为其可能由于种种原因存在内部不连通的情况),定义0—1决策变量 x_b 表示待选新建线路 b 的投建状态,0表示该线路不投建,1表示投建,所有待选新建线路的集合标记为 B 。同时,线路 b 的始末端依次标记为 f_b 和 t_b ,则式(9)可以通过原始网络导纳矩阵 \mathbf{Y}_0 表示为

$$\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{Y} \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{Y}_0 \dot{\mathbf{U}} + \sum_{b \in B} (\mathbf{M}_b \mathbf{M}_b^T x_b \dot{\mathbf{U}}) \quad (11)$$

其中,列向量 \mathbf{M}_b 为描述支路 b 和网络节点关联关系的向量,元素数量等于网络节点总数,第 f_b 个元素为1,第 t_b 个元素为-1。

实际上,矩阵 $\mathbf{M}_b \mathbf{M}_b^T$ 中仅有4个元素为非零元素,因此可以基于其稀疏特性实现 $x_b \dot{\mathbf{U}}$ 的线性化描述。具体而言,定义维数等于网络支路总数的虚拟向量 \mathbf{U}_b^f 和 \mathbf{U}_b^t ,其中对应于支路始末端的元素分别为

$$\mathbf{U}_b^f = x_b \mathbf{U}_{f_b} \quad (12)$$

$$\mathbf{U}_b^t = x_b \mathbf{U}_{t_b} \quad (13)$$

向量 \mathbf{U}_b^f 和 \mathbf{U}_b^t 中其他位置的元素则定义为0。因此,式(11)可以表示为

$$\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{Y} \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{Y}_0 \dot{\mathbf{U}} + \sum_{b \in B} (\mathbf{M}_b \mathbf{U}_b^f - \mathbf{M}_b \mathbf{U}_b^t) \quad (14)$$

对于定义式(12)、(13),通过引入数 M 使其可以分别等效为

$$-x_b M \leq \mathbf{U}_b^f \leq x_b M$$

$$U_{f_b} - M(1 - x_b) \leq U_b^f \leq U_{f_b} + M(1 - x_b) \quad (15)$$

$$-x_b M \leq \mathbf{U}_b^t \leq x_b M$$

$$U_{t_b} - M(1 - x_b) \leq U_b^t \leq U_{t_b} + M(1 - x_b) \quad (16)$$

对于数 M ,其设定的原则是决策变量 x_b 为0时,式(15)、(16)中的后一条不等式实际上处于松弛状态。

至此,网络连通性线性约束可以通过式(10)、(14)~(16)表示。

2 基于线性潮流约束的配电网规划模型

对于配电网规划,在考虑了配电网中的分布式电源、网架结构等因素的情况下,以配电网的投资建设成本、运行成本和环境成本最小为优化目标函数。

2.1 常量和变量定义

该文建立的有源配电网规划模型中涉及到的常量和变量的定义,如表1、2所示。

表1 常量定义

Table 1 Constant definition

常量	定义
γ	建设成本等年值平均系数
r	贴现率
Y	建设线路和设备的投资回收期
α	投资建设成本在目标函数中的权重系数
β	运行成本在目标函数中的权重系数
λ	环境成本在目标函数中的权重系数
C_{ab}	线路 a 建设方案 b 的费用
A	待建线路的总数
B	新建线路方案的总数
C_{de}	线路 d 更换方案 e 的费用
D	待更换线路的总数
E	更换线路方案的总数
C_{FBg}	分布式电源建设方案 g 的单位容量成本

续表

常量	定义
S_{FBfg}	节点 f 分布式电源建设方案 g 的额定建设容量
F	可能安装分布式电源节点的总数
G	分布式电源建设方案的总数
C_{JB0}	新建变电站的固定投资费用
C_{JB}	新建变电站的单位容量建设费用
S_{JBhi}	节点 h 变电站建设方案 i 的建设容量
H	可能新建变电站的节点总数
I	新建变电站的方案总数
C_{KB}	变电站扩容的单位容量建设费用
S_{KBjk}	节点 j 变电站扩容方案 k 的扩容容量
J	现有变电站节点的总数
K	变电站扩容的方案总数
C_B	配电网从上级电网购电的单位电价
$p_{B,s,t}$	典型日的类型为 s , 日内时段为 t 时, 配电网向上级电网购电的实时功率
S	一年内典型日的类型总数
δ	每一种类型典型日持续时间
T	一天中时段总数
τ	一天内每一个时段持续时间
C_{YFBg}	分布式电源建设方案 g 单位发电量的运行成本
$p_{FBfg,s,t}$	典型日的类型为 s , 日内时段为 t 时, 分布式电源建设方案 g 情形下该分布式电源的实时发电功率
C_{YB}	变电站单位容量每年的维护和检修成本
C_{EFBgl}	分布式电源建设方案 g 单位发电量产生污染物 l 带来的环境成本
L	发电产生的污染物的种类总数
C_{EBl}	向上级电网购得单位发电量产生污染物 l 带来的环境成本

表 2 0—1 决策变量定义

Table 2 0-1 Decision variables definition

变量	定义
x_{Jxab}	线路 a 采用建设方案 b 时为 1, 否则为 0
x_{HXde}	线路 d 采用更换方案 e 时为 1, 否则为 0
x_{FBfg}	节点 f 采用分布式电源建设方案 g 时为 1, 否则为 0
x_{JBhi}	节点 h 采用变电站建设方案 i 时为 1, 否则为 0
x_{KBjk}	节点 j 采用变电站扩容方案 k 时为 1, 否则为 0

2.2 目标函数

将建设成本、运行成本及环境成本的规划目标转换为单目标等年值函数的表达形式:

$$\min f(x) = \gamma\alpha C_{con}(x) + \beta C_{ope}(x) + \lambda C_{env}(x) \quad (17)$$

$$\gamma = \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \quad (18)$$

2.2.1 投资建设成本

该文考虑的配电网建设成本包括新建线路、更换线路、新建分布式电源、新建变电站及变电站扩容的成本。相关的投资建设成本可以通过如下关系给出:

$$C_{con}(x) = \sum_{a=1}^A \sum_{b=1}^B C_{ab} x_{Jxab} + \sum_{d=1}^D \sum_{e=1}^E C_{de} x_{HXde} + \sum_{f=1}^F \sum_{g=1}^G C_{FBfg} S_{FBfg} x_{FBfg} + \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I (C_{JB0} + C_{JB} S_{JBhi}) x_{JBhi} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K C_{KB} S_{KBjk} x_{KBjk} \quad (19)$$

2.2.2 运行成本

配电网的运行成本包括每年从上级电网购电的费用、分布式电源的运行和检修费用以及变电站的维护和检修费用。在运行成本分析中,考虑多场景要素,相关运行成本可以通过如下关系给出:

$$C_{ope}(x) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I C_{YB} S_{JBhi} x_{JBhi} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K C_{YB} S_{KBjk} x_{KBjk} + \sum_{s=1}^S \delta \sum_{t=1}^T \tau C_B p_{B,s,t} + \sum_{s=1}^S \delta \sum_{t=1}^T \tau \sum_{f=1}^F \sum_{g=1}^G C_{YFBg} p_{FBfg,s,t} x_{FBfg} \quad (20)$$

2.2.3 环境成本

在规划模型中,该文考虑了各种发电方案排放的环境污染物(包括 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、 CO 及 TSP 等)造成的污染排放惩罚。相关环境成本可以通过如下关系给出:

$$C_{env}(x) = \sum_{s=1}^S \delta \sum_{t=1}^T \tau \sum_{f=1}^F \sum_{g=1}^G \sum_{l=1}^L C_{EFBgl} p_{FBfg,s,t} x_{FBfg} + \sum_{s=1}^S \delta \sum_{t=1}^T \tau \sum_{l=1}^L C_{EBl} p_{B,s,t} \quad (21)$$

2.3 约束条件

2.3.1 网架结构约束

配电网规划需要满足网架结构的连通性约束。网架结构的连通性条件在 2.2 节中进行了探讨,将其整理为约束条件可通过不等式表示为

$$\begin{aligned} & [U_{n,d,t} > \epsilon \\ & \dot{I} = Y_0 \dot{U} + \sum_{b \in B} (M_b U_b^f - M_b U_b^t) \\ & -x_b M \leq U_b^f \leq x_b M \\ & \begin{cases} U_{f_b} - M(1-x_b) \leq U_b^f \leq U_{f_b} + M(1-x_b) \\ -x_b M \leq U_b^t \leq x_b M \\ U_{t_b} - M(1-x_b) \leq U_b^t \leq U_{t_b} + M(1-x_b) \end{cases} \\ & [d = 1, 2, \dots, D, t = 1, 2, \dots, T, n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (22)$$

2.3.2 发电容量约束

配电网中的电能主要来源于两方面:一是通过配电网变电站从上级电网获取到的电能,二是配电网内分布式电源发电得到的电能。因此配电网内发电容量约束条件为分布式电源的发电容量和变电站容量之和需要大于配电网的最大负荷。

$$S_{B0} + \sum_{f=1}^F \sum_{g=1}^G S_{FBfg} x_{FBfg} + \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I S_{JBhi} x_{JBhi} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K S_{KBjk} x_{KBjk} \geq \lambda \sum_n g_{n,d,t} \quad (23)$$

式中 S_{B0} 表示现有变电站的容量; λ 表示区域容载比; $g_{n,d,t}$ 表示节点 n 典型日的类型为 d , 日内时段为 t 时的有功负荷。

2.3.3 分布式电源发电容量约束

在不同典型日的不同时间段,分布式电源的发电功率均不能超过其发电容量:

$$p_{FBfg,d,t} \leq S_{FBfg} \quad (24)$$

2.3.4 电力平衡约束

在不同典型日的不同时段,配电网中分布式电源的发电功率和配电网向上级电网购电功率之和与配电网总负荷应一致,即

$$p_{B,d,t} + \sum_{f=1}^F \sum_{g=1}^G p_{FBfg,d,t} x_{FBfg} = \sum_n g_{n,d,t} / (1 - \eta) \quad (25)$$

其中, η 为配电网的平均网损率。

2.3.5 网络潮流约束

该文中的配电网潮流约束采用 2.1 节中提出的潮流方程线性模型:

$$\begin{cases} P_{m,d,t} = \sum_{n=1}^N G_{mn} U_{n,d,t} - \sum_{n=1}^N B_{mn} \theta_{n,d,t} \\ Q_{m,d,t} = - \sum_{n=1}^N B_{mn} U_{n,d,t} - \sum_{n=1}^N G_{mn} \theta_{n,d,t} \end{cases} \quad (26)$$

式中 N 表示电网节点总数; P_m 和 Q_m 分别表示节点 m 的有功注入功率和无功注入功率; U_n 和 θ_n 分别表示节点 n 的节点电压幅值和相角; G_{mn} 、 B_{mn} 分别为节点导纳矩阵中的电导和电纳。

2.3.6 支路功率约束

在不同典型日的不同时段,对于配电网中任意节点 m 、 n 之间的线路,其传输的有功功率 P_{mn} 需要满足上下限约束:

$$P_n^{\min} \leq P_{n,d,t} \leq P_n^{\max} \quad (27)$$

2.3.7 节点电压约束

在不同典型日的不同时段,配电网中节点电压幅值需满足上下限约束。

$$U_n^{\min} \leq U_{n,d,t} \leq U_n^{\max} \quad (28)$$

2.4 模型说明

式(17)~(28)提出的配电网协调规划模型为混合整数线性规划(MILP)模型。模型中的优化变量包括决定线路是否新建、线路是否更换、分布式电源是否新建、变电站是否新建、变电站是否扩容等 0-1 决策变量,分布式电源的新建容量,变电站的新建容量和扩容容量,分布式电源的年发电量以及向上级电网年购电量等连续变量。该模型可以通过一般的数学优化工具包进行求解。

3 算例分析

3.1 算例概况

采用文献[21]中算例,配电网电压等级为 10 kV,原始配电网包括 5 个节点、4 条支路,具体结构如图 1 中实线部分所示。该系统需要扩展为 13 节点配电网系统,可新建线路的通道以虚线表示,可以接入分布式电源的节点以“▽”表示。系统中节点 1 为配电网根节点,建有 35 kV/10 kV 变电站,现有 1 台 10 MV·A 变压器,可以扩建为 2×10 MV·A,配电网线路的详细参数可参见文献[21]。

该文算例中分布式能源均采用燃气冷-热-电三联供机组,其特点是功率稳定且可控,在特殊情况下支撑配电网孤岛运行的能力较强,同时能够提供

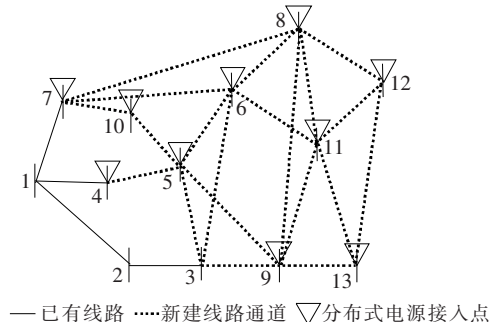


图 1 原始网架结构

Figure 1 Initial grid structure diagram

多种形式能量输出。对于可以接入新能源的节点 4~13,接入分布式能源的容量可以选择为 100 kW 的整数倍。

线路和设备的投资偿还期 $Y=20$ 年,贴现率 r 为 0.1,配电网向上级电网购电单位成本 $C_B=0.5$ 元/kW·h,区域容载比设计要求 $\lambda \geq 2$,变电站、分布式电源的投资和运行费用参数如表 3 所示。

表 3 变电站及电源参数

Table 3 Parameters of substations and generations

类型	固定投资成本/万元	单位可变投资成本/(万元/kW)	运行维护成本/(万元/kW)	投资偿还期/年
新建变电站	2 000	0.5	0.02	20
变电站扩容	800	0.5	0.02	20
新建分布式电源	0	1.6	0.03	20

为了验证该文提出的配电网线性规划模型的有效性,分别针对 3 种场景,就该文提出的配电网线性化规划模型和采用交流潮流模型描述的非线性配电网规划模型进行算例分析和对比。

场景 1:不考虑分布式电源的规划,直接进行配电网线路规划;

场景 2:先进行配电网线路规划,完成线路规划后再进行分布式电源规划;

场景 3:进行含分布式电源的配电网综合协调规划。

对于该文提出配电网线性化规划模型,基于 Matlab R2016b 数值计算平台采用 Cplex 12.6 进行编程求解,对于交流潮流方式表达的非线性配电网规划模型,采用遗传算法进行求解。算例验证在一台配置 E5-2630V 3 (2.4GHz×2)和 128G 内存的戴尔 PowerEdge R 730 服务器上进行。

3.2 线性化规划模型算例分析

场景 1 不考虑分布式电源的规划,直接进行配电网网架规划,规划结果:等年值表示的投资综合成本为 227.1 万元,年运行维护成本为 1 143.6 万元,环境成本为 155.4 万元,变电站需要扩容为 2×10 MV·A。规划建设网架结构如图 2 所示。

场景 2 先进行配电网网架规划,完成线路规划后再进行分布式电源规划,规划结果:等年值表示的投资综合成本为 461.3 万元,年运行维护成本为 776.6 万元,环境成本为 108.9 万元。规划建设网架结构如图 3 所示。其中,各分布式电源接入点的安装容量如表 4 所示。

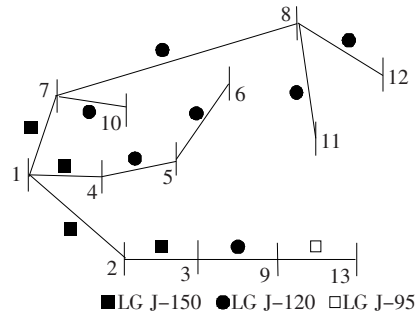


图 2 场景 1 规划结果

Figure 2 Diagram of network planning result for case 1

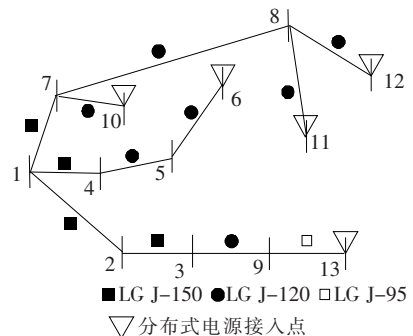


图 3 场景 2 规划结果

Figure 3 Diagram of network planning result for case 2

表 4 场景 2 分布式电源接入点的安装容量

Table 4 Case 2 installed capacity of DG access point

节点编号	安装容量/kW	节点编号	安装容量/kW
6	400	12	600
10	700	13	400
11	500		

场景 3 进行含分布式电源的配电网综合协调规划,规划结果:等年值表示的投资综合成本为 414.8 万元,年运行维护成本为 683.1 万元,环境成本为 100.7 万元。规划建设网架结构如图 4 所示。其中,各分布式电源接入点的安装容量如表 5 所示。3 种不同场景下的规划方案的成本比较如表 6 所示。

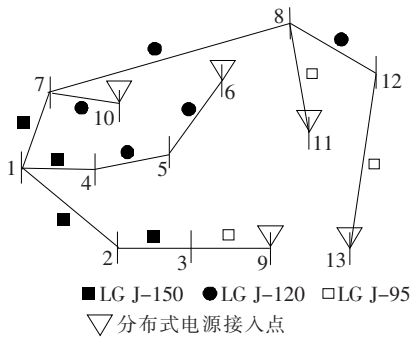


图4 场景3规划结果

Figure 4 Diagram of network planning result for case 3

表5 场景3分布式电源接入点的安装容量

Table 5 Case 3 installed capacity of DG access point

节点编号	安装容量/kW	节点编号	安装容量/kW
6	400	11	500
9	500	13	500
10	700		

表6 3种不同场景规划方案的成本比较

Table 6 Cost comparisons of three planning schemes

场景	等年值投资成本/万元	年运行维护成本/万元	环境成本/万元	总成本/万元
1	227.1	1 143.6	155.4	1 526.1
2	461.3	776.6	108.9	1 346.8
3	414.8	683.1	100.7	1 198.6

通过对比3种不同场景下的规划方案的成本可知,场景1没有进行分布式电源的规划,等年值表示的投资成本最小。但是,由于运行阶段的电能使用主要依赖于向上级电网购电,每年的运行维护成本和环境成本都是最高的,也造成了该场景的总成本最高。场景2和场景3都考虑了分布式电源的规划,虽然建设成本提高了,但是每年的运行维护成本和环境成本都大幅度下降,总成本也明显低于场景1。同时,由于场景2是先进行网架结构规划,再进行分布式电源规划,因此得到的线路规划结果和场景1相同,可能导致线路利用效率低下,进而总成本高于同时进行分布式电源和电网线路规划的场景。

3.3 非线性规划模型算例结果分析

基于遗传算法实现的非线性配电网规划模型在

3种场景下得到的网络线路和分布式电源规划结果均与4.2节中的一致。非线性配电网规划模型在3种不同场景下的规划方案的成本比较如表7所示。

表7 非线性配电网规划模型在3种不同场景下规划方案的成本比较

Table 7 Cost comparisons of three planning schemes in the nonlinear planning model

场景	等年值投资成本/万元	年运行维护成本/万元	环境成本/万元	总成本/万元
1	225.4	1 131.9	150.2	1 507.5
2	458.5	774.6	106.3	1 339.4
3	411.2	679.4	97.9	1 188.5

对比表6和表7可以发现,对于各个规划场景,配电网线性化规划模型的成本计算和非线性规划模型非常接近。对于任意一项成本的计算结果,该文提出的模型的计算结果和非线性规划模型计算得到的精确结果之间的最大相对误差为3.5%。因此,可以认为该线性化规划方法能够得到足够的计算精度。

3.4 2种规划模型计算效率对比分析

表8比较了配电网线性规划模型和非线性规划模型计算不同场景算例消耗的时间。

表8 2种规划模型计算不同场景算例消耗的时间对比

Table 8 Calculation time comparisons of three planning schemes for two models

场景	模型	平均计算时间/s
1	线性	0.126
	非线性	344.700
2	线性	0.117
	非线性	306.100
3	线性	0.195
	非线性	694.300

对比不同场景下,配电网线性规划模型和非线性规划模型求解所消耗的时间可以发现,通过Cplex进行求解的线性模型不同场景下消耗的平均计算时间均远小于通过遗传算法进行求解的非线性模型。因此,可以认为该文提出的配电网线性化规划模型是高效的。

4 结语

针对未来配电网分布式能源渗透率高、运行模式多样化的发展趋势,该文提出了包含分布式电源和网络线路规划的配电网线性规划模型。基于某配电网算例,计算了不同场景下配电网线性化规划模型的具体结果,并与非线性配电网规划模型的计算结果进行了对比。结果表明:①模型在不同场景下均得出的结果和普通配电网非线性规划模型具有一致性,说明模型具有较高的计算精度;②在保证精度的同时,模型复杂程度得以简化,计算效率较非线性规划模型有极大的提升。在后续工作中,将考虑在线性化模型的框架下如何将电动汽车及充电站等装置纳入模型范畴等,并对于能源互联网背景下的配电网综合规划提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 龚晓琴,王进,王珑,等. 含电转气的电—气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2):76-83.
GONG Xiaoqin, WANG Jin, WANG Long, et al. Low carbon economic operation of integrated power-gas interconnection energy system with electricity to gas conversion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2):76-83.
- [2] 程杉,陈欢田. 基于 Stackelberg 博弈的智能电网完全分布式需求响应策略[J]. 智慧电力, 2019, 47(3):60-65+96.
CHENG Shan, CHEN Hutian. Fully distributed demand response strategy for smart grid based on stackelberg game[J]. Smart power, 2019, 47(3):60-65+96.
- [3] 朱西平,付迁,李恣霖,等. 能源互联网多能量枢纽合作议价模型研究[J/OL]. 中国电力:1-9[2020-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20200410.0953.004.html>.
ZHU Xiping, FU Qian, LI Zilin, et al. Research on the model of multi-energy hub cooperation and bargaining in energy internet[J/OL]. Electric Power: 1-9 [2020-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20200410.0953.004.html>.
- [4] 宋倩芸. 计及多种分布式能源运行的配电网双层优化规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11):53-61.

- SONG Qianyun. A bi-level optimization planning method for a distribution network considering different types of distributed generation[J]. Power system protection and control, 2020, 48(11):53-61.
- [5] 陈根军,唐国庆. 基于禁忌搜索与蚁群最优结合算法的配电网规划[J]. 电网技术, 2005, 29(2):23-27.
CHEN Genjun, TANG Guoqing. Tabu search-ant colony optimization hybrid algorithm based distribution network planning[J]. Power System Technology, 2005, 29(2):23-27.
- [6] 盛四清,王浩. 用于配电网规划的改进遗传算法[J]. 电网技术, 2008, 32(17):69-72+83.
SHENG Siqing, Wang Hao. An improved genetic algorithm for distribution network planning[J]. Power System Technology, 2008, 32(17):69-72+83.
- [7] 李亮,唐巍,白牧可. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 33(3):58-63+128.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 33(3):58-63+128.
- [8] 张建华,曾博,张玉莹,等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2):13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key Issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2):13-23.
- [9] 肖峻,张婷,张跃,等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10):106-113+12.
XIAO Jun, ZHANG Ting, ZHANG Yue, et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):106-113+12.
- [10] 杜爱虎,胡泽春,宋永华,等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11):35-42.
DU Aihu, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations [J]. Power System Technology, 2011, 35(11):35-42.
- [11] Stott B, Jardim J, Alsac O. DC power flow revisited

- [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3):1290-1300.
- [12] 李文博. 输电网潮流与优化的理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [13] Miranda V, Ranito J V, Proenca L M. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(4):1927-1933.
- [14] 吴万禄, 韦钢, 谢丽蓉, 等. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15):65-73.
WU Wanlu, WEI Gang, XIE Lirong, et al. Coordinated planning of distribution network containing charging station and distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15):65-73.
- [15] Miguez E, Cidras J, Diaz-Dorado E, et al. An improved branch exchange algorithm for large scale distribution network planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4):931-936.
- [16] Tarn T J, Chen S B, Fang G. Robotic welding, intelligence and automation[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [17] 葛少云, 张有为, 刘洪, 等. 考虑网架动态重构的主动配电网双层扩展规划[J]. 电网技术, 2018, 42(5):1526-1536.
GE Shaoyun, ZHANG Youwei, LIU Hong, et al. B-layer expansion programming method for active distribution network considering dynamic grid reconfiguration[J]. Power System Technology, 2018, 42(5):1526-1536.
- [18] 张勇军, 林晓明, 张紫珩, 等. 基于耐受渗透比的10 kV配电网分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9):49-54.
ZHANG Yongjun, LIN Xiaoming, ZHANG Ziheng, et al. Distributed generation planning of 10 kV distribution network based on tolerant permeability ratio[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9):49-54.
- [19] YANG Jinwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. A state-independent linear power flow model with accurate estimation of voltage magnitude[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3607-3617.
- [20] Fatemi S M, Abedi S, Gharehpetian G B, et al. Introducing a novel DC power flow method with reactive power considerations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(6):3012-3023.
- [21] 杨毅, 韦钢, 周冰, 等. 含分布式电源的配电网模糊优化规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13):19-23.
YANG Yi, WEI Gang, ZHOU Bing, et al. Optimized fuzzy planning of the distribution network including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13):19-23.