

基于城市能源互联网的配电网规划优化研究

戎士敏,王 聪,贺春光,马会轻,王 涛

(国网河北省电力有限公司石家庄供电分公司,河北 石家庄 050000)

摘要:传统配电网规划方法忽略了分布式电源接入配电网前后功率值的变化,导致其规划后建设投资成本较高。为此,提出基于城市能源互联网的配电网规划优化方法。首先,计算分布式电源接入配电网前后的发电功率值,通过功率值对比分析分布式电源接入配电网前后负荷变化,确定城市能源互联网对配电网影响因素。随后,基于该影响因素建立负荷预测模型,预测配电网在城市能源互联网影响下的负荷变化。最后,设置电力供需平衡、潮流容量、电压和电流等约束条件,建立配电网规划优化模型。仿真结果表明:该配电网规划优化方法的预测区域负荷准确度高,功率预测性能与实际值相差极小,并且该方法可降低配电网规划建设投资和经营的总成本,实现配电网规划的合理化。

关键词:能源互联网;配电网规划;分布式电源;需求侧;负荷

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.007 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2022)05-0066-07

Research on distribution network planning optimization based on urban energy internet

RONG Shimin, WANG Cong, HE Chunguang, MA Huiqing, WANG Tao

(Shijiazhuang Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The traditional distribution network planning method ignores of the power difference before and after the distributed generation is connected to the distribution network, which leads to a high construction cost. Therefore, a distribution network planning optimization method is proposed on the basis of the urban energy internet. Firstly, the power of the distributed generator is calculated before and after it is connected to the distribution network. And then, the load changes are compared in terms of the power change, so as to determine the influencing factors of the urban energy internet on the distribution network. Based on these influencing factors, a load forecasting model is established to predict the change of distribution network load under the influence of urban energy internet. Finally, the constraints are introduced for power supply and demand balance, power flow capacity, voltage and current, etc., and the distribution network planning optimization model is constructed successfully. An example is included for verification. It is shown that the regional load forecasting is precise, and the difference between the forecasted performance and the actual value is small. The proposed method can reduce the investment and operation cost of distribution network planning and construction to realize a reasonable distribution network planning.

Key words: energy internet; distribution network planning; distributed power supply; demand side; load

目前,随着环境污染和能源危机不断地加剧,人们对能量的需求越来越大,而光电、风电等新能源具有环境污染小、参与面广、生态效益高等特点^[1-2]。考虑到太阳能和风能的随机性、可变性和不稳定性,将新能源的分布式电源接入配电网中会导致配电网电压不稳的情况出现^[3-4]。因此,对配电网进行合理规划至关重要。

国内大量学者对配电网规划进行了研究。文献[5]将多能流广义储能作为配电网协调规划的目标,结合随机优化和鲁棒优化 2 种方法,建立配电网规划模型;文献[6]将优化分布式储能和电动汽车网络对配电网产生的负荷功率作为配电网规划目标,设计配电网多目标规划函数;文献[7]将用户差异化可靠性需求作为配电网规划目标,建立配电网规划方程,同时针对方程运用混沌搜索算法进行求解,实现配电网规划;文献[8]将广义储能作为配电网规划目标,建立配电网双层规划模型,求解模型方案和储能运行策略。上述配电网规划方法,没有考虑分布式电源接入配电网前后功率值的变化。因此,在面对基于城市能源互联网的配电网规划时,存在经济性不高的问题。

针对上述情况,本文提出一种基于城市能源互联网的配电网规划优化方法。通过确定城市能源互联网对配电网规划的影响因素,提出配电网负荷预测模型,预测配电网在城市能源互联网影响下的负荷变化,从而根据这一变化,实现配电网规划优化。同时,与其他已有方法进行对比,证实该方法的可行性与经济性。

1 基于城市能源互联网的配电网规划优化

1.1 城市能源互联网对配电网规划影响因素的确定

分布式电源接入配电网后,在配电网运行过程中由于电压的波动会产生线损,需要通过调节配电网频率和峰值,降低配电网运行中的损耗^[9]。为此,通过计算基于城市能源互联网的分布式电源接入配电网前、后功率值变化,确定城市能源互联网对配电网规划的影响,则其接入前后的功率值^[10] ϑ 、

ϑ' 为

$$\begin{cases} \vartheta = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \cdot \dot{V} \\ \vartheta' = \frac{(P - P')^2 + (Q - Q')^2}{V^2} \cdot \dot{V} \end{cases} \quad (1)$$

式中 P 、 P' 分别为分布式电源接入配电网前后的有功功率; Q 、 Q' 分别为分布式电源接入配电网前后的无功功率; V 为相电压; \dot{V} 为电压降相量。

由式(1)可知, $\vartheta' < \vartheta$,当配电网容量较小时,可以降低配电网运行负荷;反之,则会增加配电网运行负荷。基于此,建立配电网负荷预测模型,预测分布式电源接入配电网后的功率值变化。

1.2 配电网负荷预测模型

根据式(1)提取到的城市能源互联网对配电网规划负荷影响因素,通过用方程表示发展趋势的方式预测负荷变化。为此,假设配电网历史负荷序列为 $x(1), x(2), \dots, x(D)$,其中, D 表示天数,则配电网负荷预测模型建立过程如下。

1) 计算分布式电源接入城市能源互联网的日负荷均值^[11]为

$$\bar{X}(d) = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} x(d)(t) \quad (2)$$

式中 $x(d)(t)$ 为第 d 天 t 时刻分布式电源接入城市能源互联网的负荷值, $d = 1, 2, \dots, D$ 。

2) 根据式(2),采用直线方程拟合 D 日负荷均值^[12],即

$$\bar{X}(d) = a + bd \quad (3)$$

式中 a 为斜率; b 为截距。

根据式(3),让 a 和 b 偏导数^[13]满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial \left(\sum_{t=1}^d [X(t) - x(t)]^2 \right)}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial \left(\sum_{t=1}^d [X(t) - x(t)]^2 \right)}{\partial b} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $X(t)$ 为 t 时刻负荷预测值; $x(t)$ 为 t 时刻负荷实际值。

当 a 和 b 偏导数满足(4)式时,可以让 $\sum_{t=1}^D [X(t) - x(t)]^2$ 得到的值为最小值,则 a 和 b 的计算公式为

$$\left\{ \begin{aligned} a &= \frac{\sum_{t=1}^d t^2 \cdot \sum_{t=1}^d X(t) - \sum_{t=1}^d t \cdot \sum_{t=1}^d t \cdot X(t)}{d \cdot \sum_{t=1}^d t^2 - \sum_{t=1}^d t \cdot \sum_{t=1}^d t \cdot X(t)} \\ b &= \frac{\sum_{t=1}^d (X(t) - d \cdot a)}{\sum_{t=1}^d t} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),即可得到 D 日负荷均值,则以其为基础,预测 $D+1$ 日负荷均值为

$$\bar{X}(D+1) = a + b(D+1) \quad (6)$$

3)根据 $\bar{X}(d)$ 值和 $x(d)(t)$ 值,计算分布式电源接入配电网的日负荷周期变化系数 $\lambda(d)(t)$ 和 $D+1$ 日的负荷周期变化系数 $\lambda(d+1)(t)$ 为

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda(d)(t) &= \frac{x(d)(t)}{\bar{X}(d)} \\ \lambda(d+1)(t) &= \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N x(d)(t) \end{aligned} \right. \quad (7)$$

4)得到分布式电源接入城市能源互联网产生的负荷预测值为

$$X(t) = \lambda(d+1)(t) \cdot \bar{X}(D+1) \quad (8)$$

综合上述计算公式,即可完成配电网负荷预测模型建立,根据此次研究建立的配电网负荷预测模型,预测配电网在城市能源互联网影响下的负荷变化,从而根据这一变化,实现配电网优化规划。

1.3 优化配电网规划

根据式(1)计算结果可知,将城市能源互联网分布式电源接入配电网中会影响配电网负荷。为此,根据配电网负荷预测模型,预测得到的负荷值,设置配电网供需平衡、电力潮流、主变容量、配电网运行可靠性、电压和电流等约束条件,将配电网最小成本为目标,建立配电网规划优化模型。

分布式电源接入城市能源互联网后配电网电压存在波动性和随机性,会导致配电网负荷出现明显地增加和减少。当配电网在运行时,在城市能源互联网的分布式电源作用下,会通过配电网各个元件流入负荷。再加上城市能源互联网的分布式电源受新能源的不确定因素影响,存在较高的不确定性。因此,当其在配电网中占比过高时,会导致配电网负荷失衡,出现配电网电能质量下降、停止运

行等问题。为此,针对配电网的电力供需平衡、主变潮流容量、电压和电流等进行约束。假设式(8)得到的配电网负荷需求预测值^[14]为 $X(t)$, 则有

$$\left\{ \begin{aligned} f(\epsilon) \cdot p_1(\epsilon) + \sum_{i=1}^m \kappa_i^2 o_i \cdot (1 - p_0) &= X(t) \\ \varphi_{U_i} \sum_{j \in i} \varphi_{U_j} (R_{ij}^0 \cos \bar{\omega}_{ij} + B_{ij}^0 \sin \bar{\omega}_{ij}) &= p_i \\ \varphi_{U_i} \sum_{j \in i} \varphi_{U_j} (R_{ij}^0 \sin \bar{\omega}_{ij} + B_{ij}^0 \cos \bar{\omega}_{ij}) &= q_i \\ \sum_{j=1}^{m_\epsilon} o_{\epsilon_j} &\leq \eta X(t) \\ |\varphi_{U_i}^{\min}| &\leq |\varphi_{U_i}| \leq |\varphi_{U_i}^{\max}| \\ |I_i| &\leq |I_i^{\max}| \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中 $\bar{\omega}_{ij}$ 为电压角度差值; $f(\epsilon)$ 为城市能源互联网为配电网提供的能源 ϵ 概率密度函数; η 为配电网最大主变容量的安全系数; R_{ij}^0 为支路电组; $p_1(\epsilon)$ 为城市能源互联网中的发电设备平均输出功率; φ_{U_i} 为配电网第 i 个节点处电压 U 的幅值; $\varphi_{U_i}^{\min}$ 为 φ_{U_i} 的下限; m 为可建变电站数量; I_i 为配电网第 i 个节点处支路电流; q_i 为配电网第 i 个节点无功功率; B_{ij}^0 为支路电纳; κ_i^2 为 $0 \sim 1$ 的变量,当 $\kappa_i^2 = 1$ 时,表示第 i 个节点处存在变电站,当 $\kappa_i^2 = 0$ 时,表示第 i 个节点处不存在变电站; $\varphi_{U_i}^{\max}$ 为 φ_{U_i} 的上限; j 为与节点 i 相连接的节点; o_i 为第 i 个节点处变电站容量; o_{ϵ_j} 为电源容量; φ_{U_j} 为配电网第 j 个节点处电压 U 的幅值; m_ϵ 为可行布局点总数; p_0 为配电网故障率; p_i 为配电网第 i 个节点有功功率; I_i^{\max} 为 I_i 允许通过电流的上限。

在式(9)所示的限制条件下,根据此次研究确定的配电网规划优化目标,建立配电网规划模型^[15]如下:

$$\begin{aligned} \$_1 &= \sum_{i=1}^n \kappa_i^0 \zeta_i^0 + \sum_{i=1}^m \kappa_i^1 (-\mu_i) \zeta_{ei}^1 + \sum_{i=1}^m \zeta_i^2 + \\ P^1 &\sum_{i=1}^n \kappa_i^0 \zeta_i^0 + \gamma^1 \sum_{i=1}^n R_{ij}^0 p_i^2 + \sum_{i=1}^{m_\epsilon} \kappa_i^1 \eta o_{\epsilon_j} + \sum_{i=1}^m \delta_i^2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中 γ^1 为配电网年网损费用系数; R_{ij}^0 为配电网年成本; μ_i 为第 i 个节点处投资城市能源互联网的缓建系数; n 为配电网待建支路总数; κ_i^0 、 κ_i^1 均为 $0 \sim 1$ 的变量,当 $\kappa_i^0 = 1$ 时,选择第 i 个节点处支路建

设, $\kappa_i^1 = 1$ 时, 选择第 i 个节点连接城市能源互联网, 当 $\kappa_i^0 = 0$ 时, 第 i 个节点处不建设支路, $\kappa_i^1 = 0$ 时, 第 i 个节点处不连接城市能源互联网; δ_i 为配电网固定运行费率; ζ_i^0 、 ζ_{ei}^1 、 ζ_i^2 分别为 κ_i^0 ($i = 1$)、 κ_i^1 ($i = 1$)、 κ_i^2 ($i = 1$) 的固定投资费用。

根据式(10)所示的配电网规划优化模型, 即可在式(9)的约束条件下, 将城市能源互联网的分布式电源接入配电网中, 实现配电网规划优化。

2 实验与分析

选择文献[6]提出的考虑分布式储能的配电网规划优化方法和文献[7]提出的考虑用户差异化的配电网规划优化方法作为此次实验的对比方法, 将具有城市能源互联网的某个城市的一个区域作为此次实验研究对象, 验证此次研究的配电网规划方法的效果。

2.1 配电网规划区域现状

此次实验选择的的城市配电网规划优化区域分布如图 1 所示。

由图 1 可知, 城市配电网规划优化区域分布共包含商业、工业、公共设施、居民、市政、绿化、学校等城市分布区域, 其区域面积以及其分别每平方米负荷密度, 如表 1 所示。

由图 1、表 1 可知, 所选区域接入城市能源互联网的电源支持点仅支持 110 kV 和 220 kV 的变电站, 其中, 110 kV 的变电站在配电网规划优化过程

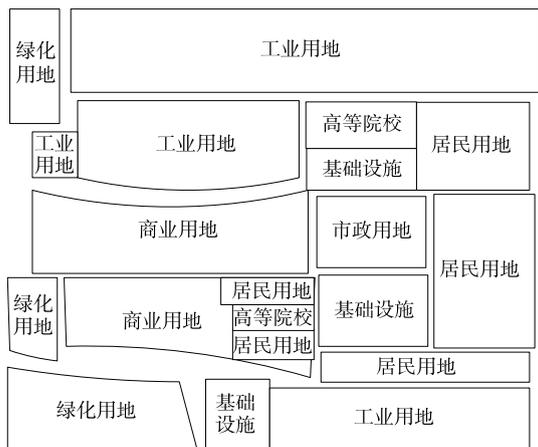


图 1 配电网规划优化区域空间分布

Figure 1 Schematic diagram of spatial distribution of distribution network planning and optimization area

表 1 城市分布区域面积以及分别每平方米用电量
Table 1 Urban distribution area and load density per square meter respectively

区域	城市用地	区域面积/km ²	用电量/(W/m ²)
a	商业	0.400	120
b	工业	1.610	60
c	公共设施	0.050	12
d	居民	0.220	80
e	市政	0.285	15
f	绿化	2.270	10
g	学校	0.285	40

中, 仅支持 110、35、10 kV 的电压等级序列, 220 kV 则仅支持 220、110、35 kV 或 220、35、10 kV 这 2 种电压等级序列; 由于需要针对配电网的电力供需平衡、主变潮流容量、电压和电流等进行约束。因此, 对于 220 kV 的主变潮流容量限定为 1 320 MV · A 以内, 110 kV 的主变潮流容量限定为 480 MV · A 以内, 负荷约束上限为 724.458 MW。

2.2 分布式电源接入配电网前后功率对比

在本文提出的基于城市能源互联网的配电网规划优化方法中, 计算了分布式电源接入配电网前后功率值, 通过功率值对比分布式电源接入配电网前后负荷变化, 确定城市能源互联网对配电网影响因素, 如图 2 所示。

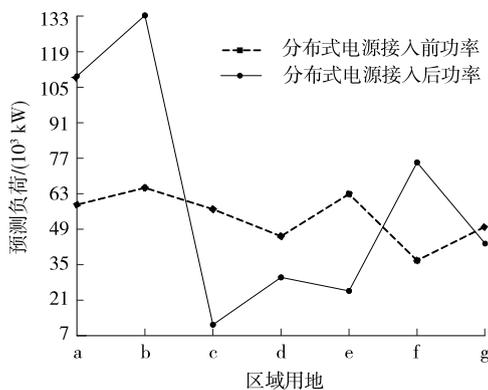


图 2 分布式电源接入配电网前后功率对比

Figure 2 Power comparison before and after distribution network connected to distributed generation

由图 2 可知, 分布式电源接入后, 配电网功率得到明显提升, 有利于配电网最大准入容量的优化, 提高电压稳定性, 证明了本次研究具有可行性。

2.3 配电网规划成本

此次实验选择的配电网规划成本如表 2 所示。

表2 配电网规划优化造价

Table 2 Optimization cost of distribution network planning

变电 站/kV	单位变电站/ (元/(kV·Δ))	单位线路/ (万元/km)	分布式电源运维 费用/(万元/MW)	平均销售电价/ (元/(MW·h))
220	250	115	3.25	532.00
110	77	108		

2.4 实验方法

根据此次实验选择的配电网规划优化区域,采用3组配电网规划优化方法,分别预测此次实验选择的配电网规划负荷,并将其预测结果与该城市所需要承担的实际负荷进行对比。对比方法为文献[6]提出的考虑分布式储能的配电网规划优化方法和文献[7]提出的考虑用户差异化的配电网规划优化方法。基于配电网规划优化城市负荷预测结果,采用3组配电网规划优化方法分别设计该城市的配电网规划优化方案,比较3组配电网规划优化方法设计的组配电网规划优化方案经济性。

2.5 实验结果

1) 功率预测。

采用文献[6-7]方法和本文方法对实验选择的配电网进行规划优化,优化后的功率预测结果如图3所示。

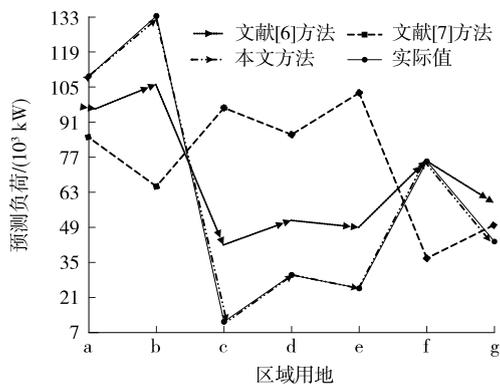


图3 功率预测结果对比

Figure 3 Comparison of regional power prediction results

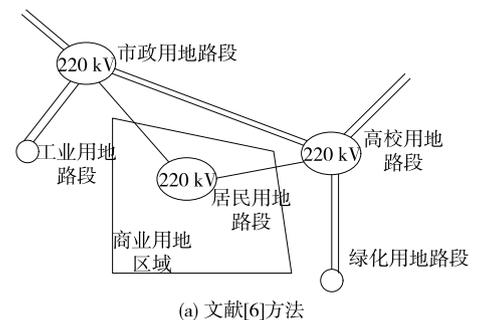
由图3可知,文献[6]方法预测该城市 a、b、c、d、e、f、g 不同地块的功率值,与实际功率相差分别为 5 639.7、10 472.7、15 312.8、6 791.6、79 460.3、0、4 327.2 kW;文献[6]方法预测该城市 a、b、c、d、e、f、g 不同地块用地功率值,与实际功率相差分别为 6 941.8、53 493.6、65 394.2、49 270.1、60 371.5、

8 104.6、5 371.5 kW;而本文方法预测该城市 a、b、c、d、e、f、g 不同地块的功率值,与实际功率相差分别为 0、100.3、50.7、0、0、37.1、83.4 kW。由此可见,本文方法相较于文献[6-7]方法,与实际值更为接近,功率预测值相差极小。原因是本文方法考虑了城市能源互联网对配电网规划的影响因素,构建了配电网规划优化模型,并设置了各类约束条件,实现了配电网负荷预测。表明本文方法具有较优的配电网功率预测性能。

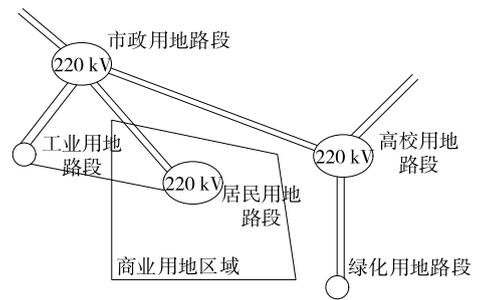
2) 配电网规划优化方案。

依据图2所示的3组配电网规划优化方法,3组方法设计的配电网规划优化方案,如图4所示。

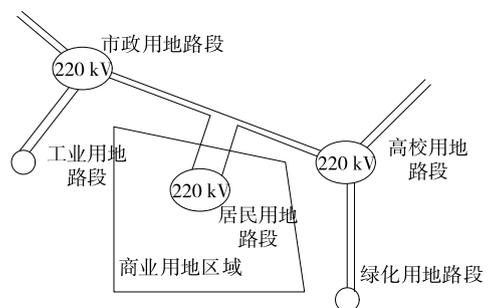
在市政用地路段和高校用地路段分别建设一座 220 kV 变电站(见图4(a)),并让其与居民用地路段相连接,同时,在工业用地路段和绿化用地路段



(a) 文献[6]方法



(b) 文献[7]方法



(c) 本文方法

图4 配电网规划优化方案对比

Figure 4 Comparison diagram of distribution network planning and optimization schemes

段扩建出与 200 kV 变电站相关的出线间隔及相关设备,此外,还在商业用地中新建 6 个 110 kV 变电站,接入 150 MW 的分布式光伏。图 4(b)图在工业用地路段新建 110 kV 变电站一座,居民用地路段新建 220 kV 变电站,出线一回连接工业用地路段,出线两回连接市政用地路段,此外,还在商业用地中新建 6 个 110 kV 变电站,接入 150 MW 的分布式光伏。图 4(c)图在居民用地路段新建 220 kV 变电站,分别接入市政用地路段回线和高校用地回线,此外,还在商业用地中新建 5 个 110 kV 变电站,接入 150 MW 的分布式光伏。

3) 方案经济性对比。

依据表 2 所示的配电网规划优化造价,计算图 4 所示的 3 组方法设计的配电网规划优化方案的建设投资成本、经营成本和总成本,其中经营成本又称运营成本,是确保配电网正常运行所需要投入的成本,其计算结果如图 5 所示。

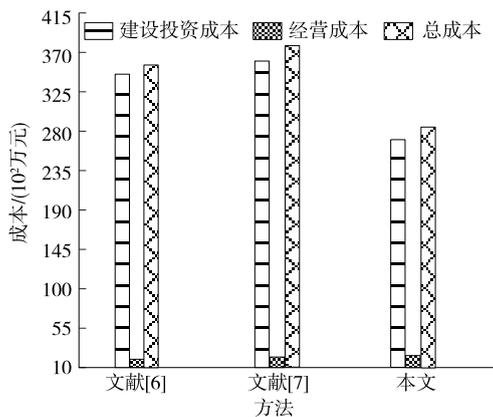


图 5 配电网规划优化成本

Figure 5 Distribution network planning optimization cost

由图 5 可知,文献[6]方法的建设投资成本、经营成本及总成本分别为 34 009.5、1 700.4、35 709.9 万元;文献[7]方法的建设投资成本、经营成本及总成本分别为 36 130.5、1 806.3、37 937.0 万元;本文方法的建设投资成本、经营成本及总成本分别为 26 994.5、1 837.2、28 831.2 万元。本文方法相对于文献[6-7]方法,虽经营成本分别高出 136.8、30.7 万元,但建设投资成本分别降低了 7 015.0、9 136.0 万元,因此总成本分别降低了 6 878.7、9 105.8 万元。由此可见,本文方法设计的城市配电网规划优化方案所需要投入的总成本最小。主要

是由于本文方法在特定的约束条件下,将城市能源互联网的分布式电源接入配电网中,达到削峰填谷平衡负荷的目的,实现配电网规划优化。

3 结语

综上所述,此次研究充分考虑城市能源互联网对配电网规划的影响因素,依据这一影响因素,设计配电网规划优化约束,达到削峰填谷平衡负荷的目的,降低了配电网建设和运营的投入总成本。但是此次设计的目标函数较为单一,在今后的研究中,还需深入研究城市能源互联网背景下,配电网规划优化过程中,分布式电源接入配电网位置,进一步提高规划城市负荷预测性能,降低配电网建设和运营成本。

参考文献:

- [1] 李谦,江宇栋,刘尧,等.配电网低频涌流对电磁式电压互感器影响和抑制方法的分析[J].高压电器,2022,58(2):142-148+157.
LI Qian,JIANG Yudong,LIU Yao,et al.Analysis of influence of low frequency inrush current of distribution network on electromagnetic potential transformer and its suppression method[J].High Voltage Apparatus,2022,58(2):142-148+157.
- [2] 潘爱强,杜凤青.“双碳”背景下上海城市能源互联网构建技术需求分析[J].电力与能源,2021,42(3):368-372.
PAN Aiqiang,DU Fengqing.Technical requirements analysis of urban energy internet construction in Shanghai under the "30 · 60"strategy[J].Power & Energy,2021,42(3):368-372.
- [3] 马小铭,靳伍银.基于改进蚁群算法的多目标路径规划研究[J].计算技术与自动化,2020,39(4):100-105.
MA Xiaoming,JIN Wuyin.Mult-objective path planning based on improved and colony algorithm[J].Computing Technology and Automation,2020,39(4):100-105.
- [4] NIKOObakht A,AGHAEI J,MASSRUR H R,et al.Decentralised hybrid robust/stochastic expansion planning in coordinated transmission and active distribution networks for hosting large-scale wind energy[J].IET Generation,Transmission & Distribution,2020,14(5):797-807.
- [5] 袁方方,赵江信,郭宝甫,等.分布式光伏电源与配电网

- 协调控制策略研究[J].电测与仪表,2020,57(24):116-124.
- YUAN Fangfang, ZHAO Jiangxin, GUO Baofu, et al. Research on coordinated control strategy of distributed photovoltaic generation and distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24):116-124.
- [6] 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.
- [7] 李俊杰,邓嘉明,姜世公,等.考虑用户差异化可靠性需求的配电网规划方法[J].电网与清洁能源,2021,37(5):74-82.
- LI Junjie, DENG Jiaming, JIANG Shigong, et al. A distribution network optimization planning method based on differential reliability demand[J]. Power Grid and Clean Energy, 2021, 37(5):74-82.
- [8] 房宇娇,李树静,李宏仲,等.考虑广义储能的配电网双层规划研究[J].可再生能源,2020,38(11):1541-1550.
- FANG Yujiao, LI Shujing, LI Hongzhong, et al. Research on Bi-level planning of distribution network considering generalized energy storage[J]. Renewable Energy, 2020, 38(11):1541-1550.
- [9] 孙艳霞,方是文,李震.海上风电经交流电缆汇集送出系统暂态无功电压建模及特性分析[J].中国电力,2022,55(4):166-174.
- SUN Yanxia, FANG Shiwen, LI Zhen. Transient voltage-reactive power modeling of offshore wind power collection and transmission system with AC cables and characteristic analysis[J]. Electric Power, 2022, 55(4):166-174.
- [10] 黄家祺,张宇威,贺继锋,等.一种考虑极限场景的配电网鲁棒扩展规划方法[J].电力建设,2020,41(7):67-74.
- HUANG Jiaqi, ZHANG Yuwei, HE Jifeng, et al. A robust expansion planning method of distribution networks considering extreme scenarios[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(7):67-74.
- [11] 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.
- [12] 路坦,李建泽,吴仲超,等.不确定性下柔性分布式多能源发电系统扩展规划[J].计算技术与自动化,2020,39(3):114-119.
- LU Tan, LI Jianze, WU Zhongchao, et al. Extension planning of flexible distributed multi-energy generation system under uncertainty[J]. Computing Technology and Automation, 2020, 39(3):114-119.
- [13] 金烨璇,张桐郡,王坤,等.基于原对偶优化模型的配电网规划方法研究[J].智慧电力,2020,48(3):109-116.
- JIN Yexuan, ZHANG Tongjun, WANG Kun, et al. Distribution network planning method based on prime-dual optimization model[J]. Smart Power, 2020, 48(3):109-116.
- [14] 蔡佳铭,祝燕萍,刘波.协调源荷不确定性的配电网扩展规划[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):67-75.
- CAI Jiaming, ZHU Yanping, LIU Bo. Distribution network expansion planning coordinating source-load uncertainty[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):67-75.
- [15] 任泓宇,王主丁,张永斌,等.计及技术标准的高压配电网无功优化规划[J].电网技术,2020,44(4):1463-1473.
- REN Hongyu, WANG Zhuding, ZHANG Yongbin, et al. Reactive power optimization planning of high-voltage distribution networks with technical standards being considered[J]. Power System Technology, 2020, 44(4):1463-1473.