

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181269

## 基于多代理的主动配电网规划样本自动模拟研究

李天友<sup>1</sup>, 刘智媛<sup>2</sup>, 林焱<sup>2</sup>, 林芳<sup>2</sup>, 柴雁欣<sup>3</sup>, 刘俊勇<sup>3</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003; 2. 国网福建省电力科学研究院, 福建 福州 350007;  
3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 可再生能源的高渗透率接入、柔性负荷的高参与度、运行协调管理的高效可靠要求, 均使得传统的管理投资方式难以满足多主体接入下配电网的投资发展要求。为适应主动配电网中多主体接入, 促进清洁能源的消纳, 为配电网精确投资规划提供丰富样本, 提出基于多代理的主动配电网规划样本自动模拟模型。基于构建的分布式电源、储能及柔性负荷的多代理时序模型, 提出了以电网代理引导的主动配电网自动协调模拟策略; 考虑负荷增长模式与配电网技术路径更迭, 实现不同投资方案下主动配电网的规划样本自动模拟, 以提高主动配电网中多主体的利用效率。算例结果表明, 所提模型通过追随主动配电网技术路径的发展, 能够有效实现配电网长时间尺度的运行模拟。通过自动模拟方法产生的分布式电源出力与负荷波动情况等配电网特征量可用取代作为后续配电网投资规划的数据样本。

**关键词:** 多代理; 自动模拟; 动态协调; 负荷增长模式; 技术路径

### Automatic simulation study of planning samples of active distribution network based on multi-agent

LI Tianyou<sup>1</sup>, LIU Zhixuan<sup>2</sup>, LIN Yan<sup>2</sup>, LIN Fang<sup>2</sup>, CHAI Yanxin<sup>3</sup>, LIU Junyong<sup>3</sup>

(1. State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China; 3. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** With the high increasing penetration of renewable energy, high participation levels of flexible load and high efficiency and reliable operation of coordination management, it is difficult to meet the investment development requirements of distribution network with multi-agent access by traditional way. In order to adapt to the multi-agent access and promote clean energy consumption and provide rich samples for precise investment planning of active distribution network, a model of planning sample automation simulation is proposed based on multi-agent and technical path. According to the built multi-agent models of DG, ESS and flexible loads, an automation coordinated strategy by grid agent guidance is designed. At the same time, in order to improve the utilization efficiency of multi-agent in active distribution network, the model considers load growth and the change of technology path to analyze the economic operation ability under different schemes. The results of the model are verified by following the development of technology path to realize the simulation of long-time scale of active distribution network. The characteristic quantity such as the output of distributed generation and the fluctuation of load generated by automatic simulation method can be substituted as the data sample of the subsequent investment planning of active distribution network.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52130417002R).

**Key words:** multi-agent; automation simulation; dynamic coordination; load growth model; technical path

## 0 引言

为适应我国经济增长与经济结构发展的要求,

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52130417002R)“主动配电网的技术路径发展及精确投资辅助决策技术研究及应用”

多能互补的主动配电网(Active Distribution Network, ADN)是未来电网发展的必然方向<sup>[1-3]</sup>, 投资建设安全可靠、经济高效、技术先进、环境友好的配电网网络设施和服务体系至关重要。

主动配电网技术路径主要包含资源配置与电网改造。在市场环境下配电网的投资规划过程中, 负荷与分布式电源(Distribution Generator, DG)的发

展状态直接影响了主动配电网技术路径的改造与发展方向<sup>[4-6]</sup>。文献[6]考虑新型负荷与分布式电源接入对主动配电网规划的影响,提出了考虑新型负荷接入的负荷预测模型,构建了分布式电源装机容量与分布的预测模型;为缓解配电网规划投资过高、设备利用率低等问题,文献[7]提出考虑市场因素影响的负荷预测新方法,以提高配电网投资规划的经济性。

面对负荷需求增长、清洁能源接入与主动性资源调度需求,寻找经济、高效的配电网技术路径成为亟待解决的问题。文献[8]基于规划成本及运行风险,提出以经济性为目标,考虑配电网主动性资源管理方式的扩展规划模型;文献[9]考虑分布式电源与负荷随机性,提出一种基于机会约束的配电网扩展规划模型。但是,传统的配电网投资规划模型是基于潮流平衡与网络安全等约束建立,这些约束均为非线性非凸约束;此外,模型中涉及到的配电网性能指标也需要通过外嵌程序计算得到。当技术路径变得复杂时,常规模型在采用智能算法求解时可能会陷入局部最优,求解效率较低。同时,在现有扩展规划研究中,基础历史数据缺乏且准确性不足,难以充分体现主动配电网发展趋势。因此,需要考虑一种新的配电网投资规划模型以解决上述模型存在的求解效率低及数据缺失等问题。

在新的配电网投资规划模型中,为了规避传统模型中的非线性非凸约束及性能指标外嵌迭代程序,考虑采用机器学习或统计学方法建立基于数据关联规则驱动的投资规划模型。通过计算得到模拟产生的不同规划方案实施场景下的配网性能指标,并将模拟产生的配电网分布式能源出力及负荷波动等特征量与对应的性能指标作为输入样本,通过机器学习或统计学算法得到技术路径与配电网性能指标的关联规则,嵌入投资规划模型。为了保证关联规则的精确性,需要足够充分的模拟样本,以体现不同技术路径实施下的主动配电网运行特性。因此,需要构建一种新的样本模拟方法实现配电网规划数据模拟,该方法可以作为未来新型主动配电网投资规划模型的基础。

在实际主动配电网规划中,由于各区域经济发展与气候环境的影响,一成不变的负荷和分布式能源模型并不满足电网发展趋势。鉴于传统考虑柔性负荷和分布式能源接入主动配电网的集中规划方法存在运行特征复杂、计算量大且求解困难等问题<sup>[10-12]</sup>,具有分散自治管理模式与协调优化能力的多代理模型被引入刻画柔性负荷、分布式电源和储能等多主体在配电网中的多元互动行为<sup>[13-15]</sup>。文献[13]以经济性为目标基于多代理提出了适应主动配

电网区域自治与全局协同的控制架构;文献[14]考虑储能的实时优化调度、柔性负荷与电网互动特性,提出基于多代理系统的多源协调调度策略;文献[15]提出一种适应智能电网多元元件协同的多代理协调控制架构。上述文献充分验证了多代理系统运用于配电网分散式资源协调控制的优势,也充分表明多代理技术可以很好地应用于多元主体接入下的主动配电网样本模拟过程。但其研究多考虑短时间周期内的协调优化,未考虑中长期时段的多主体元件协调运行与时序模拟。

基于上述考虑,本文针对主动配电网中柔性负荷、分布式电源和储能等多能源综合电力系统的中长期发展投资决策,构建基于多代理协调的主动配电网规划样本自动模拟模型,为投资决策分析提供数据基础。针对配电网中多类型主动元件提出时序动态模拟的多代理模型与协调策略;同时基于主动配电网中负荷增长模式与技术路径更迭,实现长时间尺度下主动配电网的协调运行模拟分析,为主动配电网精确投资提供数据支持。最后以 IEEE33 节点系统为例,分析不同发展模式下主动配电网运行协调控制水平,验证了所提模型的合理性、有效性。

## 1 多代理建模与协调策略

随着主动配电网中大量主动、分散式资源的引入,传统运行协调方式难以实现主动配电网的灵活、有效调度。多代理系统通过利益主体的区域自我管控与协调优化,实现主动配电网的动态运行管理。本文针对主动配电网中不同类型元件构建区域代理模型。

### 1.1 DG 代理模型

本文以光伏、风机出力模型为例,构建分布式电源的区域代理模型,以实现区域内清洁能源的最大化消纳<sup>[16]</sup>。

光伏出力受光照时间与光照强度影响,采用 Beta 分布描述其出力的随机性,其概率密度函数如式(1)所示。

$$f(P_{pv}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{P_{pv}}{P_{max}}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{P_{pv}}{P_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha = \mu \left[ \frac{\mu(1-\mu)}{\delta^2} - 1 \right] \\ \beta = (1-\mu) \cdot \left[ \frac{\mu(1-\mu)}{\delta^2} - 1 \right] \end{cases} \quad (2)$$

光伏发电机的输出功率概率密度函数如式(3)所示。

$$E(P_{PV}) = \int_0^{P_{\max}} P_{PV} f(P_{PV}) dP_{PV} \quad (3)$$

式中:  $\Gamma$  为 Gamma 函数;  $P_{PV}$  为太阳能电池方阵输出功率;  $P_{\max}$  为太阳能电池方阵最大输出功率;  $\alpha$  和  $\beta$  为 Beta 分布的形状参数;  $\mu$  和  $\delta$  为一定时段内光照强度的平均值和方差;  $E(P_{PV})$  为光伏的期望输出功率。

风机输出功率受风速影响, 两者关系如式(4)所示。

$$P_{W,t} = \begin{cases} 0 & v_t < v_c, v_t > v_f \\ R_W \left( \frac{v_t - v_c}{v_s - v_c} \right)^3 & v_c < v_t < v_s \\ R_W & v_s < v_t < v_f \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{W,t}$  为  $t$  时刻风机输出功率;  $v_t$  为  $t$  时刻风速;  $v_c$  为切入风速;  $v_f$  为切出风速;  $v_s$  为额定风速;  $R_W$  为风机额定容量。

短期风速分布符合正态分布特性, 因此本文中风机的日输出功率的概率密度函数如式(5)所示。

$$E(P_{W,t}) = \int_{v_c}^{v_s} R_W \left( \frac{v_t - v_c}{v_s - v_c} \right)^3 f(v_t) dv_t + \int_{v_s}^{v_f} R_W f(v_t) dv_t \quad (5)$$

式中:  $E(P_{W,t})$  为风机的期望输出功率;  $f(v_t)$  为风速的概率密度函数。

为促进主动配电网中分布式电源的消纳, DG 代理以区域内分布式能源最小削减量为目标, 即

$$\begin{cases} \min f_{DG} = \alpha_D \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D P_{d,t}^{\text{cut}} \\ \text{s.t.} \quad 0 \leq P_{DG,t} \leq P_{DG}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\alpha_D$  为切 DG 的惩罚系数;  $P_{d,t}^{\text{cut}}$  为  $t$  时刻第  $d$  个 DG 的切除量;  $T$  为时间周期;  $D$  为主动配电网中 DG 的集合;  $P_{DG,t}$  为  $t$  时刻 DG 的出力;  $P_{DG}^{\max}$  为 DG 出力上限。

## 1.2 储能代理模型

储能调节基于分时电价, 低电价时充电以促进 DG 消纳, 高电价时放电以缓解主网供电压力<sup>[17-18]</sup>。基于配电网电价引导, 储能代理以区域内储能收益最大化为协调控制目标, 即

$$\max f_{ES} = \sum_{t \in T} (c_{\text{dis},t} \Delta P_{\text{dis},t} - c_{\text{ch},t} \Delta P_{\text{ch},t}) \quad (7)$$

式中:  $c_{\text{ch},t}$ 、 $c_{\text{dis},t}$  为  $t$  时刻储能的充、放电电价;  $\Delta P_{\text{ch},t}$ 、 $\Delta P_{\text{dis},t}$  为  $t$  时刻储能的充、放电量。

其中, 储能的状态函数与约束如式(8)所示。

$$SOC_{t+1} = SOC_t + \eta_{\text{ch}} P_{\text{ch},t} \Delta t - \eta_{\text{dis}} P_{\text{dis},t} \Delta t \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ch},t} \leq \Delta P_{\text{ch},t}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{dis},t} \leq \Delta P_{\text{dis},t}^{\max} \\ SOC^{\min} \leq SOC_t \leq SOC^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $SOC_t$  为  $t$  时刻储能的荷电状态;  $P_{\text{ch},t}$ 、 $P_{\text{dis},t}$  分别为  $t$  时刻储能的充、放电功率;  $\Delta t$  为充、放电的持续时间;  $P_{\text{ch},t}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{dis},t}^{\max}$  分别为  $t$  时刻储能的最大充、放电功率;  $SOC^{\min}$ 、 $SOC^{\max}$  为储能装置荷电状态的最小值、最大值。

## 1.3 柔性负荷代理模型

柔性负荷的可中断性、可激励性为主动配电网削峰填谷提供了一种有效的负荷调节方式<sup>[19-20]</sup>。柔性负荷代理以区域内柔性负荷调节能力最大化为代理响应目标, 如式(10)所示。

$$\max f_L = \sum_{t \in T} \left( \sum_{l \in L(\text{RE})} \rho_l^{\text{RE}} P_{l,t}^{\text{RE}} + \sum_{l \in L(\text{IN})} \rho_l^{\text{IN}} P_{l,t}^{\text{IN}} \right) \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_{l,t} = P_{l,t}^{\text{IN}} - P_{l,t}^{\text{RE}} \\ P_{l,\min}^{\text{IN}} \leq P_{l,t}^{\text{IN}} \leq P_{l,\max}^{\text{IN}} \\ P_{l,\min}^{\text{RE}} \leq P_{l,t}^{\text{RE}} \leq P_{l,\max}^{\text{RE}} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\rho_l^{\text{RE}}$  为中断负荷补偿系数;  $P_{l,t}^{\text{RE}}$  为  $t$  时刻第  $l$  个柔性负荷用户的中断负荷量;  $\rho_l^{\text{IN}}$  为增加负荷的激励系数;  $P_{l,t}^{\text{IN}}$  为  $t$  时刻第  $l$  个柔性负荷用户的增加负荷量;  $P_{l,t}$  为  $t$  时刻第  $l$  个柔性负荷用户的负荷调节量;  $P_{l,\min}^{\text{RE}}$ 、 $P_{l,\max}^{\text{RE}}$  分别为第  $l$  个柔性负荷用户可中断的最小、最大可调节量;  $P_{l,\min}^{\text{IN}}$ 、 $P_{l,\max}^{\text{IN}}$  分别为第  $l$  个柔性负荷用户可增加负荷的最小、最大可调节量。

## 1.4 电网代理模型

电网代理为全局性代理, 以主动配电网全局调度经济性为目标, 引导、校验区域代理的协调自治结果, 实现配电网中多参与主体的主动优化调度。电网代理的目标函数如式(12)所示。

$$\min C = c_{\text{loss}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N r_{ij} i_{ij,t}^2 + c_e \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^E \Delta P_{e,t} + c_L \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L P_{l,t} + \alpha_D \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D P_{d,t}^{\text{cut}} \quad (12)$$

式中:  $C$  为调节总成本;  $c_{\text{loss}}$  为网损成本;  $r_{ij}$  为支路  $ij$  的电阻;  $i_{ij,t}$  为  $t$  时刻流过支路  $ij$  的电流;  $c_e$  为储能的单位调节成本;  $\Delta P_{e,t}$  为  $t$  时刻第  $e$  个储能的调节容量;  $c_L$  为柔性负荷的调节成本;  $P_{l,t}$  为  $t$  时刻第  $l$  个柔性负荷的调节量;  $N$  为主动配电网节点总数;

$E$  为主动配电网中储能装置集合;  $L$  为主动配电网中柔性负荷集合。

电网代理的安全校验约束条件:

(1) 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{d,t} + P_{e,t} + P_{l,t} - P_{i,t} = P_{i,t}^{\text{in}} \\ Q_{d,t} + P_{l,t} - Q_{i,t} = Q_{i,t}^{\text{in}} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{d,t}$ 、 $Q_{d,t}$  分别为  $t$  时刻第  $d$  个 DG 在节点  $i$  的有功、无功出力;  $P_{e,t}$  为  $t$  时刻第  $e$  个储能在节点  $i$  的有功出力;  $P_{l,t}$ 、 $Q_{l,t}$  分别为  $t$  时刻柔性负荷在节点  $i$  的调节量;  $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  的有功、无功;  $P_{i,t}^{\text{in}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{in}}$  为  $t$  时刻节点  $i$  的有功、无功注入量。

(2) 有功、无功潮流约束

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{in}} = v_{i,t} \sum_{j=1}^N v_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t}^{\text{in}} = v_{i,t} \sum_{j=1}^N v_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $v_{i,t}$ 、 $v_{j,t}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  和节点  $j$  的电压幅值;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  之间的电导、电纳;  $\theta_{ij,t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  和  $j$  之间电压相角差。

(3) 节点电压约束

$$v_i^{\min} \leq v_{i,t} \leq v_i^{\max} \quad (15)$$

式中:  $v_i^{\max}$ 、 $v_i^{\min}$  为节点电压上、下限。

(4) 支路功率约束

$$|P_{ij,t}| \leq P_{ij}^{\max} \quad (16)$$

式中:  $P_{ij,t}$  为  $t$  时刻流过线路  $i-j$  的功率;  $P_{ij}^{\max}$  为线路  $i-j$  允许流过的最大功率。

## 1.5 基于多代理的自动模拟

基于多代理的配电网自动模拟过程如图 1 所示。时刻初, 电网代理作为主导代理向区域协调代理发送配电网协调请求, 分别向 DG 代理、储能代理及柔性负荷代理发送负荷需求信息、电网电价信息及区域负荷响应的激励信息。DG 代理依据当前区域出力状态反馈区域可支撑电量; 储能代理依据电价信息及储能状态制定储能充放电策略, 并向电网代理反馈动作请求; 柔性负荷依据电网代理的激励信息, 提供当前可响应负荷总量。电网代理根据区域协调代理的反馈信息, 在满足配电网安全运行约束下制定各区域代理的协调策略, 并下发指令协调区域代理动作, 则当前模拟结束, 进入下一时段。

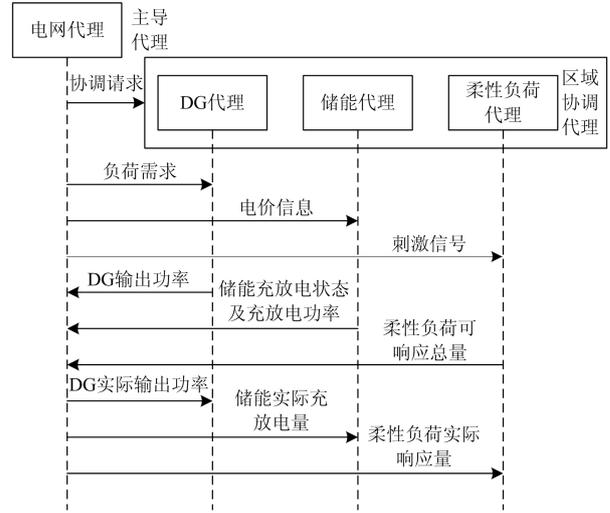


图 1 基于多代理的自动模拟

Fig. 1 Automation simulation based on multi-agent

## 2 配电网负荷增长与技术路径更迭

受地区经济与政策影响, 配电网负荷呈现增长趋势, 在保证运行安全的基础上, 利用有限的投资对配电网进行扩展规划以实现主动配电网的经济运行。

### 2.1 负荷的增长模式

主动配电网中负荷需求与时间的函数呈现复杂的非线性关系, 受配电网区域气候变化、国家政策导向、经济发展趋势与用户用电习惯等多类因素影响, 具有非线性、饱和性等特点。目前配电网中负荷预测模型主要有 3 种。

#### 1) 比例系数模型

比例系数模型假设区域内负荷未来增长趋势与历史增长比例相同, 利用已有负荷数据的增长系数预测未来负荷的大小。比例系数法的计算比较容易, 通常用在计算短期内负荷预测, 但是需要获取足够的信息。

#### 2) 回归拟合模型

回归模型有一元线性回归、多元线性回归、非线性回归等预测模型。线性回归一般用于中长期的负荷预测。回归拟合模型通过区域负荷的历史变化规律建立分析模型。

#### 3) 加权非线性模型

主动配电网的负荷增长具有一定规律, 但政策导向与环境参数的改变也增加了区域负荷增长的随机性, 单一函数的增长模型难以充分体现负荷变化特性。因此, 加权非线性模型兼具负荷惯性作用与随机因素作用, 该方法能够较好地适应中长期负荷预测中各种影响因素对负荷增长的影响, 本文采用

此类模型。

本文考虑负荷增长主要基于负荷增长因子进行年度预测与月度预测。月度负荷主要考虑不同负荷类型的时序特征建立月因子与日因子来描述其增长特征,该因子来自于历史数据估计,类似于比例系数模型。年度负荷增长主要考虑序列预测法<sup>[21]</sup>,预测方法如图2所示。

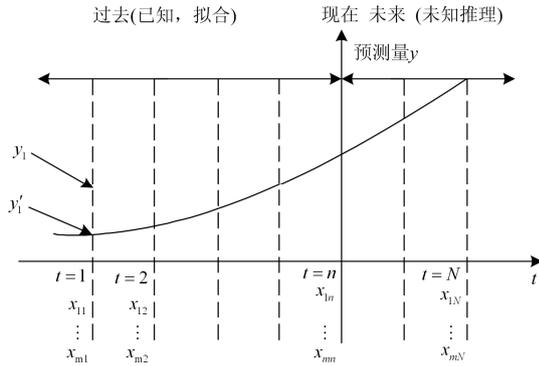


图2 序列预测方法

Fig. 2 Sequence prediction method

预测模型的抽象表达形式为

$$p = f(\mathbf{S}, \mathbf{X}, t) \quad (17)$$

式中： $\mathbf{X}$ 为  $m$  种相关因素组成的向量；记为  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ ； $t$ 为时间序号； $p$ 为待预测量； $\mathbf{S}$ 为预测模型的参数向量，设总共有  $k$  个参数， $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_k]^T$ 。

基于负荷预测的日、月水平因子，对于配电网中任意节点  $i$  在时序上的有功、无功负荷可利用下列公式计算。

$$P_i = P_{i_0} \cdot M(u, m) \cdot D(u, d) \cdot (1 + \alpha)^y \cdot \beta_i \quad (18)$$

$$Q_i = \left| \tan \left( \cos^{-1} f_{i_0} \right) \right| \cdot P_i \quad \forall i, d, m, y \quad (19)$$

式中： $M(u, m)$ 和  $D(u, m)$ 分别为月负荷因子和日负荷因子； $P_{i_0}$ 为节点  $i$  基准负荷； $\alpha$ 和  $y$ 分别为该节点年均负荷增长率以及时序模拟年数； $\beta$ 为不确定性因子，通常可取 0.85~1.15 的随机均匀分布； $f_{i_0}$ 表示基准功率因数。

### 2.2 主动配电网的技术路径

主动配电网中 DG 与储能的引入提高了配电网的安全运行能力,但也增加了配电网规划的复杂性。在满足负荷增长需求与网络现状的基础上,通过有限的投资改造,以适应当前及未来电网的发展要求,配电网中主要的技术路径如表1所示。

### 3 主动配电网运行模拟

为减缓配电网投资决策周期,提高分布式资源

协调运行能力,本文建立了电网代理主导, DG、储能、柔性负荷协同的分层多代理模型,如图3所示。

表1 配电网技术路径

Table 1 Technology path of distribution network	
技术路径	单位成本
风机投资	0.4 万/kW
光伏投资	0.88 万/kW
储能投资	0.34 万/kW·h
无功资源投资	0.58 万/kvar
配变改造	40 万/MVA
线路扩容	14 万/km
柔性负荷增长	切负荷补偿价 0.6 元/kW·h

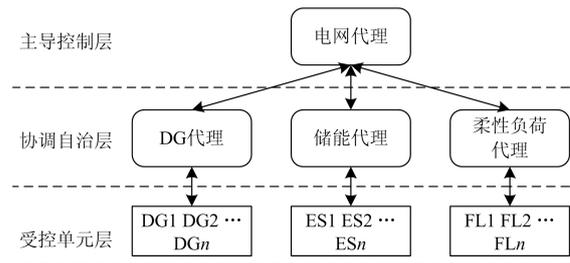


图3 主动配电网运行协调多代理模型

Fig. 3 Multi-agent model of ADN

主动配电网的协调运行是在图3的多代理控制框架下,考虑主动配电网负荷增长变化,协调自治代理模型在主导电网代理的激励约束下,依靠区域自治调节实现配电网优化运行。当多代理协调模型无法实现配电网安全运行时,进行配电网技术路径投资,以实现精确投资下配电网的经济运行。其中需要输入的基础数据包含各代理模型的基础数据,如分布式电源中影响风机出力的风速、影响光伏出力的光照与温度、影响储能出力和柔性负荷调节的电价及影响负荷增长模型的日因子、月因子等。配电网运行模拟过程如图4所示。

主动配电网运行模拟步骤如下。

(1) 收集区域历史负荷数据,分析区域经济发展趋势以及未来政策导向。

(2) 确定区域负荷增长模型,预测配电网未来节点负荷量。

(3) 利用多代理协调配电网优化运行:

① 各时刻初始,电网代理以配电网协调成本最小为目标,向协调自治代理下发请求信息;

② 协调自治层接受激励信号,基于区域自治优化原则响应主导代理,制定区域控制策略;

③ 协调自治层代理将区域协调结果反馈回电网代理,由电网代理进行安全校验;

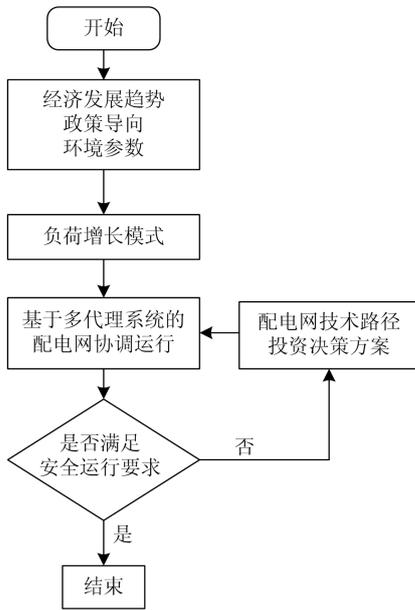


图 4 基于多代理的配电网运行模拟流程  
Fig. 4 Simulation of AND based on multi-agent

④ 若满足安全运行, 则返回步骤①进行下一时刻协调优化; 若不满足安全运行约束, 且配电网仍具有一定调节能力, 返回步骤①重新制定协调策略; 若不满足安全运行约束, 且配电网达到最大调节能力, 则转至步骤(4)。

(4) 依据主动配电网发展趋势, 以有限的投资制定适于区域配电网发展趋势的技术路径。

(5) 返回步骤(3), 基于配电网新的网络状态进行协调控制, 若在全周期内满足安全运行约束, 则配电网运行模拟结束; 若不满足安全运行约束, 则返回步骤(3)。

#### 4 算例分析

本文以 IEEE33 节点系统为例, 对提出的模型进行验证分析, 拓扑结构如图 5 所示, 系统基准电压为 12.66 kV, 基准功率为 10 MVA。主动配电网中 DG 参数如表 2 所示, 储能参数如表 3 所示, 区域中的负荷变动如图 6 所示。

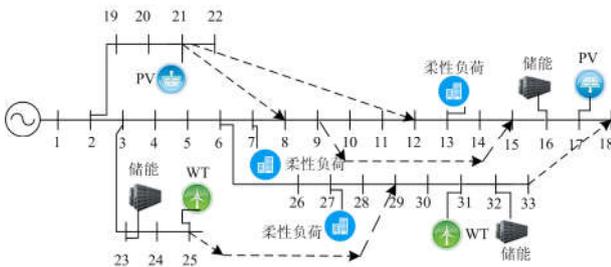


图 5 主动配电网拓扑结构  
Fig. 5 Topology of AND

表 2 DG 参数表

Table 2 Parameter of DG

安装节点	安装类型	装机容量/kW
17	PV	200
21	PV	200
25	WT	300
31	WT	300

表 3 储能参数表

Table 3 Parameter of ESS

安装节点	容量/kW·h
16	100
23	150
32	100

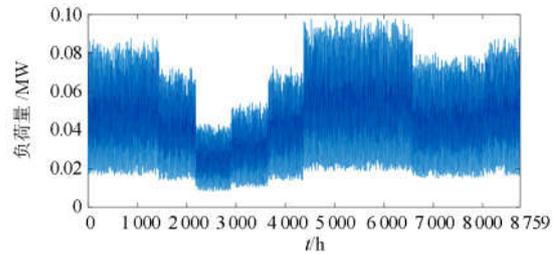


图 6 区域某节点全年负荷波动

Fig. 6 Fluctuation of the load of certain bus in the area

为验证所提方法的适应性, 对现有研究中配电网模型与本文模型进行对比分析。

Case1: 基于配电网当前拓扑状态。

Case2: 仅考虑配电网负荷的增长模型。

Case3: 仅考虑配电网技术路径发展。

Case4: 本文所提模型考虑配电网中负荷的增长模型与配电网技术路径发展趋势。

上述 4 种场景下的清洁能源渗透率对比如图 7 所示。

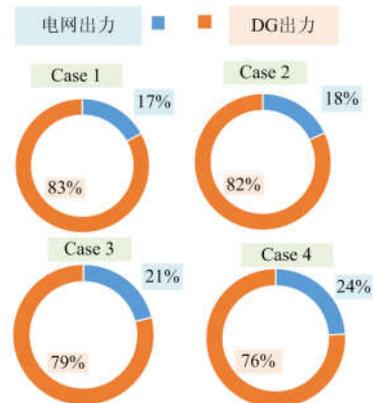


图 7 各场景下的清洁能源渗透率对比

Fig. 7 Comparison of the penetration of clean energy in different cases

利用多代理协调模型对以上 4 种配电网发展模式进行协调控制,电网代理的协调结果如图 8 所示。电网初始需求如图 8(a)所示,场景 1 中, DG 出力过剩,由储能及柔性负荷协调后仍难以实现 DG 全消纳,因此需由电网代理下发 DG 出力削减指令;场景 2 中,负荷增长,因此 DG 待消纳量减少,经协调控制后仍有部分时刻需削减 DG 出力;场景 3 中, DG 渗透率增加,负荷水平保持不变,导致配电网中大部分时刻需要削减 DG 出力,运行经济性较差;场景 4 中,负荷增加且负荷增加速度较 DG 渗透率增加更快,从全周期来看,在保证运行经济性的同时基本实现配电网清洁能源的全消纳。

某天 DG 的协调结果如图 9 所示。场景 1,现有负荷状态下,对 DG 消纳能力较弱,导致弃风弃

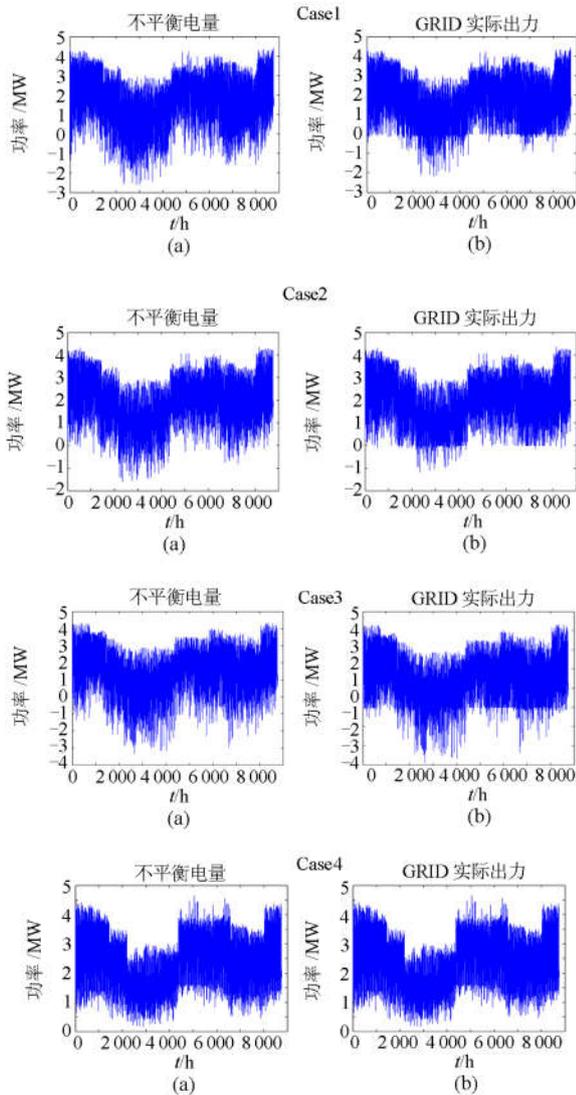


图 8 不同方案的协调结果  
Fig. 8 Results under different schemes

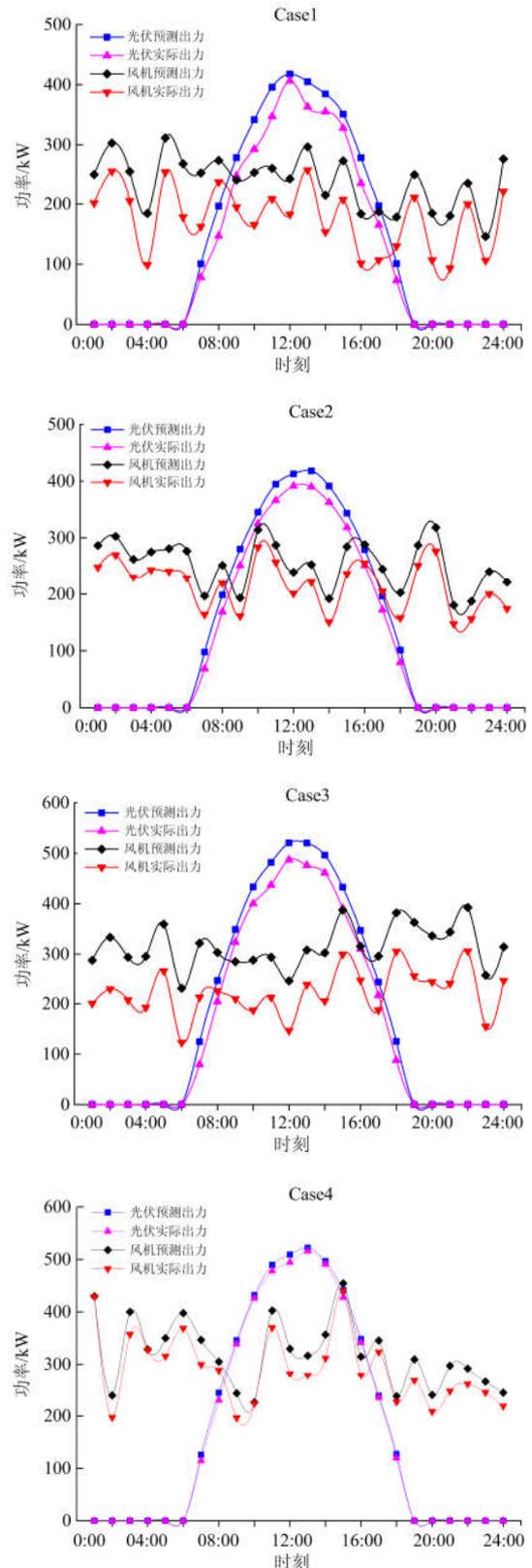


图 9 不同方案下 DG 协调控制结果  
Fig. 9 DG coordinated results under different schemes

光情况出现; 场景 2, 随着配电网发展, 负荷呈增长趋势, 逐渐消纳现有风光出力; 场景 3, 随着配电网发展, DG 渗透率增加但区域负荷水平不变, 导致 DG 消纳困难, 出现大量弃风弃光现象; 场景 4, 随着配电网发展, DG 渗透率增加且区域负荷增长, 利用多代理协调运行能尽可能实现清洁能源消纳。

场景 4 下, 某天储能与柔性负荷的协调结果分别如图 10、图 11 所示。

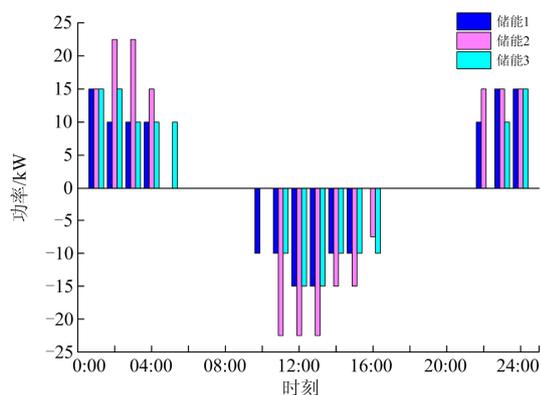


图 10 场景 4 中储能的协调结果

Fig. 10 Coordinated results of ESS under Case4

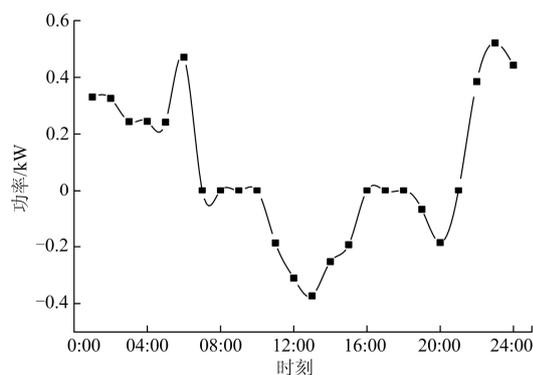


图 11 场景 4 中柔性负荷的协调结果

Fig. 11 Coordinated results of flexible load under Case4

本文所提模型中, 储能在电价的引导下基于区域电网需求低充高放, 尽可能满足电网发展状态下负荷增长的供电需求, 同时促进了高渗透清洁能源的消纳。柔性负荷受电网需求控制, 日间负荷高峰时退出电网, 夜间负荷低谷响应电网激励, 有效降低了负荷峰谷差, 提高了配电网运行安全性, 缓解了电网投资压力。

## 5 结论

随着主动配电网中多能源的快速发展, 柔性负荷种类和数量不断增加, 基于主动配电网的发展趋势, 实现中长时间尺度下配电网的协调运行变得尤

为重要。

本文提出考虑负荷增长模式与技术路径投资的主动配电网规划样本自动模拟模型。考虑配电网中 DG、储能及柔性负荷的特点, 构建了区域协调代理模型; 针对配电网负荷增长模型, 制定适应主动配电网发展的技术路径方案; 同时利用多代理协调模型对发展态的配电网进行协调控制, 以分析配电网的运行安全状态。

相比于传统的配电网投资决策, 本文模型充分考虑配电网的发展趋势, 利用多代理模型充分挖掘分散资源的协调能力, 实现配电网规划样本的自动模拟, 为精确投资提供了数据支撑。

## 参考文献

- [1] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 121-127.  
DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 121-127.
- [2] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 计及电动汽车充电模式的主动配电网多目标优化重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 1-9.  
ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Multi-objective optimization of active distribution network reconfiguration considering electric vehicle charging mode[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 1-9.
- [3] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [4] KOUTSOUKIS N C, GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. Multistage coordinated planning of active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 32-44.
- [5] ARFOA A A. Long-term load forecasting of Southern Governorates of Jordan Distribution Electric System[J]. Energy & Power Engineering, 2015, 7(5): 242-253.
- [6] 钟清, 孙闻, 余南华, 等. 主动配电网规划中的负荷预测与发电预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3050-3056.  
ZHONG Qing, SUN Wen, YU Nanhua, et al. Load and power forecasting in active distribution network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3050-3056.
- [7] XU W, WANG Y, LI T, et al. Long term intelligent load

- forecasting method considering the expectation of power market transaction[C] // Chinese Control And Decision Conference, May 28-30, 2017, Chongqing, China: 2310-2315.
- [8] 邢海军, 程浩忠, 杨镜非, 等. 考虑多种主动管理策略的配电网扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 70-76.  
XING Haijun, CHENG Haozhong, YANG Jingfei, et al. Distribution network expansion planning considering multiple active management strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 70-76.
- [9] HUANG Y, ALVEHAG K, SÖDER L. Distribution network expansion planning considering distributed generation using probabilistic voltage constraints[C] // International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, July 7-10, 2014, Durham, UK: 1-6.
- [10] 李珂, 邵能灵, 张沈习, 等. 考虑相关性的分布式电源多目标规划方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 51-57.  
LI Ke, TAI Nengling, ZHANG Shenxi, et al. Multi-objective planning method of distributed generators considering correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 51-57.
- [11] 滕春贤, 李智慧. 二层规划的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 45-48.
- [12] GAO Y, HU X, YANG W, et al. Multi-objective bi-level coordinated planning of distributed generation and distribution network frame based on multi-scenario technique considering timing characteristics[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1415-1429.
- [13] 蒲天骄, 刘克文, 李焯, 等. 基于多代理系统的主动配电网自治协同控制及其仿真[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1864-1874.  
PU Tianjiao, LIU Kewen, LI Ye, et al. Multi-agent system based simulation verification for autonomy-cooperative optimization control on active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1864-1874.
- [14] SONG X, LI J, MENG X. Hierarchical control model of smart distribution network based on self-organizing multi-agent system[C] // International Conference on Renewable Power Generation, October 17-18, 2015, Beijing, China: 6-6.
- [15] 杨洋, 吕林, 肖万芳, 等. 主动配电网多代理能量管控的分层协同策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(7): 117-124.  
YANG Yang, LÜ Lin, XIAO Wanfang, et al. A hierarchical coordination strategy of energy management based on multi-agent system in active distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(7): 117-124.
- [16] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10-17.  
WU Xiong, WANG Xiuli, LI Jun, et al. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 10-17.
- [17] 王彦虹, 邵能灵, 嵇康. 含大规模风光电源的配电网储能电池选址定容优化方案[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 23-30.  
WANG Yanhong, TAI Nengling, JI Kang. Optimal battery storage allocation in distributed network with large-scale of wind and photovoltaic generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 23-30.
- [18] 朱泽锋, 赵晋泉, 魏文辉, 等. 主动配电网中电池储能系统最优充放电策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 47-53.  
ZHU Zefeng, ZHAO Jinquan, WEI Wenhui, et al. Optimal charging and discharging scheme of battery energy storage system in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 47-53.
- [19] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 等. 计及大规模风电和柔性负荷的电力系统供需侧联合随机调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 63-69.  
YANG Nan, WANG Bo, LIU Dichen, et al. An integrated supply-demand stochastic optimization method considering large-scale wind power and flexible load[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 63-69.
- [20] 马红伟, 甄立敬, 毛建容, 等. 区域柔性负荷参与功率调度的评价体系构建及其应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 63-69.  
MA Hongwei, ZHEN Lijing, MA Jianrong, et al. Evaluation system construction and application research of regional flexible load participation in power scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 63-69.
- [21] 康重庆, 夏清, 张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 1-11.  
KANG Chongqing, XIA Qing, ZHANG Boming. Review of power system load forecasting and its development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11.

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2019-05-08

作者简介:

柴雁欣(1995—), 女, 通信作者, 研究方向为配电网规划与投资决策。E-mail: ziqi\_chai@163.com

(编辑 许威)