

# 计及灵活性辅助服务费用的配电网灵活型资源优化配置

牛焕娜<sup>1</sup>, 钱立<sup>1</sup>, 杨璐<sup>1,2</sup>, 王坤<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 山西大学电力与建筑学院, 山西太原 030006;  
3. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江杭州 310008)

**摘要:**针对高渗透率可再生能源配电网短时间大幅功率波动造成的灵活性调节能力不足问题,为了减少配电网对上级电网灵活性供给的依赖,提出了计及上级电网灵活性辅助服务费用的灵活型资源优化配置方法。定义了表征配电网灵活性水平的关口功率波动程度评价指标,基于Copula理论制定了配电网灵活性评估方法,给出了基于节点功率对关口功率波动影响指标排序的灵活型资源安装位置选择方法;进而面向未来电力市场场景,基于配电网对上级电网灵活性需求和上级电网灵活性供给能力之间的平衡博弈,结合各类型灵活型资源设备灵活性供给约束,构建了计及上级电网灵活性辅助服务费用的灵活型资源优化配置模型。配电网算例仿真结果表明,所提出的灵活型资源配置方法能够有效降低配电网年总运行费用,提高可再生能源消纳量和系统供电可靠性,削弱关口功率波动程度,从而减轻可再生能源和随机性负荷波动对上级电网造成的冲击影响。

**关键词:**配电网;灵活性评估;灵活型资源;辅助服务费用;优化配置

**中图分类号:**TM 74

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202110039

## 0 引言

随着配电网中可再生能源渗透率的不断提升和设备电气化的不断推进,可再生能源的间歇性和随机性以及用户用电行为的不确定性给电网的安全运行带来了挑战。频繁地平衡快速、大幅度的功率波动将成为高渗透率可再生能源配电网运行的常态,这就要求系统有足够的调节和响应能力,即灵活性供给能力<sup>[1-3]</sup>。

灵活型资源能够接受配电网调度灵活改变运行状态以平衡系统中频繁的功率波动,是满足系统灵活性需求的灵活型供给源,充裕的灵活型资源已成为高渗透率可再生能源配电网稳定运行的必需条件。因此,在充分考虑配电网网络结构影响以及有功无功无法解耦等特点的条件下,开展高渗透率可再生能源配电网的灵活型资源规划成为提升系统灵活性的有效途径。

灵活型资源规划离不开灵活性评估问题,通过评估现有系统的灵活性需求情况进而开展灵活型资源的优化配置。针对灵活性评估问题,文献[4-5]将系统适应负荷波动性和不确定性的能力视为系统灵活性,反映系统稳定运行的能力。文献[6]明确了不确定性因素包括电源侧和负荷侧供需两侧,同时认为电力系统的灵活性是一个相对概念。文献[7-8]从机理上进行了分析,认为灵活性不是对不确定性

和扰动的鲁棒约束,而是对灵活性供给的平衡能力,并且文献[7]从灵活性平衡角度提出了基于需求-供给指标的多时间尺度通用计算模型。可以看出,针对配电网灵活性的文献还仅限于概念和研究方向的初步阶段,虽然有少量面向配电网灵活性的研究,但也只是通过可再生能源消纳量、电压越限率等指标被动地评估配电网灵活性。而综合考虑网络传输能力、高比例可再生能源接入状况下节点有功无功波动情况,从而构造用于短周期内功率调节的配电网灵活性评估指标还未出现。

针对灵活型资源规划问题,文献[9]研究了包括风机、光伏、储能电池、微型燃气轮机和电容器组等在内的广义电源的规划问题,通过合理配置广义电源以消除电源和负荷波动的不确定性,提高了可再生能源渗透率;文献[10-11]研究了通过储能装置的优化配置,解决可再生能源接入引起的功率随机波动问题;文献[12]以虚拟电厂的形式对配电网进行规划,通过不同电源与储能装置之间的相互配合以消除可再生能源出力不确定性的影响;文献[13]基于综合能源系统的形式对配电网灵活型资源进行规划,通过建立多能互补协调发展的综合模型以提高可再生能源消纳率;文献[14]提出了配电网灵活性供给与需求评估指标,建立了考虑系统灵活性平衡约束的配电网灵活调节资源优化配置双层规划模型。总体而言,现有的规划方法多是基于能量平衡和功率平衡展开,没有考虑到配电网功率波动引起的功率调节与响应问题,对高渗透率可再生能源配电网短时间大幅的功率波动问题适应性不强。

另外,在高渗透率可再生能源配电网中,各节点

收稿日期:2021-05-20;修回日期:2021-09-08

基金项目:广西电网公司科技项目(GXKJXM20190612)

Project supported by the Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Corporation(GXKJXM20190612)

可再生能源与负荷不确定性引起的各节点功率波动从而导致配电网关口节点功率波动增大,使得配电网对上级电网的灵活性需求增大,亟需通过在配电网中对关口节点功率波动影响较大的节点处安装灵活型资源,从而减少配电网对上级电网灵活性供给的依赖,尽量将灵活性供需平衡问题在配电网本就地解决。针对以上问题,本文首先提出基于关口功率波动程度评价指标的配电网灵活性评估方法;然后建立基于节点功率对关口功率波动影响指标排序的灵活型资源安装位置选择方法;进而基于配电网对上级电网灵活性需求和上级电网灵活性供给能力之间的平衡博弈,结合各类型设备灵活性供给约束,建立考虑上级电网灵活性辅助服务费用的灵活型资源优化配置模型;最后通过天津某区域配电网实际算例仿真验证了模型的有效性。

## 1 基于关口功率波动程度评价指标的配电网灵活性评估

配电网与上级电网相连的节点为关口节点,在高渗透率可再生能源配电网中,各节点可再生能源与负荷不确定性引起各节点功率波动,从而导致配电网关口节点功率波动增大,使得配电网对上级电网的灵活性需求增大。为此,本节定义并推导关口功率波动程度评价指标  $F_t^{s,p}$ ,用于表征某场景日  $s$  下  $t$  时刻配电网内各节点功率变化引起的关口节点处有功功率波动情况,以反映该配电网对上级电网造成的冲击影响,从而表征该配电网灵活性供需平衡状况,为配电网灵活型资源规划奠定基础。

### 1.1 关口功率波动程度评价指标

关口节点是配电网的根节点,在潮流计算中作为平衡节点,其电压幅值和相角为恒定值,有功功率波动量表达式如式(1)所示。

$$\Delta P_{1,t}^s = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_0}{\partial \theta} & \frac{\partial P_0}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{1,t}^s$ 为某场景日  $s$  下  $t$  时刻关口节点有功功率波动量; $\Delta \theta$ 、 $\Delta V$ 分别为除关口节点外其他各节点电压相角和幅值波动量的列向量; $A$ 、 $B$ 分别为关口节点有功功率  $P_0$ 对其他各节点电压相角和幅值求偏导形成的分块矩阵。

由牛顿-拉夫逊法潮流修正方程式推导可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (H - NL^{-1}J)^{-1} & -H^{-1}N(L - JH^{-1}N)^{-1} \\ -L^{-1}J(H - NL^{-1}J)^{-1} & (L - JH^{-1}N)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_t^s \\ \Delta Q_t^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\Delta P_t^s$ 、 $\Delta Q_t^s$ 分别为某场景日  $s$  下  $t$  时刻各节点有功功率和无功功率波动量列向量; $H$ 、 $N$ 、 $J$ 、 $L$ 为该时

刻牛顿-拉夫逊法潮流计算最后一次迭代的雅可比系数矩阵的分块矩阵。将式(2)代入式(1),可得:

$$\Delta P_{1,t}^s = M_t^s \begin{bmatrix} \Delta P_t^s \\ \Delta Q_t^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $M_t^s$ 为某场景日  $s$  下  $t$  时刻各节点有功功率、无功功率预期波动量对关口节点有功功率预期波动量的灵敏度矩阵,其表达式如式(4)所示。

$$M_t^s = (A - BL^{-1}J)(H - NL^{-1}J)^{-1} \times (B - AH^{-1}N)(L - JH^{-1}N)^{-1} \quad (4)$$

所定义的关口功率波动程度评价指标  $F_t^{s,p}$ 为:

$$F_t^{s,p} = \left| \Delta P_{1,t}^s \right| = \left| M_t^s \begin{bmatrix} \Delta P_t^s \\ \Delta Q_t^s \end{bmatrix} \right| \quad (5)$$

由式(5)可知,关口功率波动程度评价指标  $F_t^{s,p}$ 为非负值。 $F_t^{s,p}$ 越大,表明该配电网在某场景日  $s$  下  $t$  时刻自身调节能力越差,灵活性水平越低; $F_t^{s,p}$ 越小,表明该配电网在某场景日  $s$  下  $t$  时刻自身调节能力越强,灵活性水平越高。

### 1.2 基于关口功率波动程度评价指标的配电网灵活性评估方法

由关口功率波动程度评价指标式(5)可知,开展配电网灵活性评估的关键是如何获取各节点在该时刻的有功功率、无功功率预期波动量,且该预期波动量能从历史统计规律上体现出前期状态对后续状态的影响。基于 Copula 理论<sup>[15]</sup>,本节以有功功率波动量期望值为例建立各节点有功功率波动量期望值的评估方法,同理可以得到无功功率波动量期望值,在此不再赘述,最后提出基于关口功率波动程度评价指标的配电网灵活性评估方法。

#### 1.2.1 基于相邻时刻有功功率相关性 Copula 函数的节点有功功率波动量期望值评估

以某节点  $i$  为例,评估步骤可以分为 2 步:步骤 1,构建节点  $i$  上各类型设备相邻时刻有功功率相关性 Copula 分布函数;步骤 2,计算节点  $i$  下一时刻有功功率波动量期望值。详细流程如下。

##### 1) 步骤 1 的构建流程。

首先对节点  $i$  的历史数据进行分类处理。对配电网历史数据分别以节点、设备类型、时刻进行分类,获得  $t$  时刻节点  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 下设备类型  $\psi$  的第  $j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 个有功功率样本数据  $p_{i,\psi,t,j}$ ,其中, $\psi=1, 2, 3$  分别代表光伏、风机、负荷的设备类型; $t=1, 2, \dots, 24$ ,表示一天 24 h; $m$ 为样本容量; $n$ 为节点总数。

通过式(6)所示核密度估计的方法获取时刻  $t$  节点  $i$  下设备类型  $\psi$  的有功功率  $p_{i,\psi,t}$  的密度函数  $f(p_{i,\psi,t})$ 。

$$f(p_{i,\psi,t}) = \frac{1}{mh} \sum_{j=1}^m K \left( \frac{p_{i,\psi,t} - p_{i,\psi,t,j}}{h} \right) \quad (6)$$

式中: $K(\cdot)$ 为核函数,本文选用高斯核函数, $K(u)=(1/\sqrt{2\pi})\exp(-u^2/2)$ ;  $h$ 为窗宽系数。

根据密度函数获得  $t$  时刻节点  $i$  下设备类型  $\psi$  的有功功率分布函数  $F(p_{i,\psi,t})$ , 由其对应密度函数在其取值范围内积分得到, 如式(7)所示。

$$F(p_{i,\psi,t}) = \int_0^{\infty} f(p_{i,\psi,t}) dp_{i,\psi,t} \quad (7)$$

生成  $t, t+1$  相邻时刻的节点  $i$  下设备类型  $\psi$  有功功率相关性的各类 Copula 分布函数  $C_k(F(p_{i,\psi,t}), F(p_{i,\psi,t+1}))$ , 如式(8)所示。

$$C_k(F(p_{i,\psi,t}), F(p_{i,\psi,t+1})) = \Phi_k(\Phi_k^{-1}(F(p_{i,\psi,t})), \Phi_k^{-1}(F(p_{i,\psi,t+1}))) \quad (8)$$

式中: $F(p_{i,\psi,t+1})$ 为  $t+1$  时刻节点  $i$  下设备类型  $\psi$  有功功率的分布函数;  $\Phi_k(\cdot)$  为第  $k$  类 Copula 函数的生成元函数,  $\Phi_k^{-1}(\cdot)$  为其逆函数, 各类 Copula 函数的生成元函数取自正态 Copula 函数、 $t$ -Copula 函数、阿基米德 Copula 函数等常用生成元函数。

生成  $t, t+1$  相邻时刻节点  $i$  下设备类型  $\psi$  的有功功率相关性的经验 Copula 分布函数  $C_e(F(p_{i,\psi,t}), F(p_{i,\psi,t+1}))$ , 其表达式如式(9)所示。

$$C_e(F(p_{i,\psi,t}), F(p_{i,\psi,t+1})) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I[p_{i,\psi,t,j} \leq \bar{p}_{i,\psi,t,j}] I[p_{i,\psi,t+1,j} \leq \bar{p}_{i,\psi,t+1,j}] \quad (9)$$

式中: $\bar{p}_{i,\psi,t,j}$ 、 $\bar{p}_{i,\psi,t+1,j}$  分别为  $t, t+1$  时刻节点  $i$  下设备类型  $\psi$  的第  $j$  个有功功率样本数据统计量;  $I[\cdot]$  为指示性函数, 若  $p_{i,\psi,t,j} \leq \bar{p}_{i,\psi,t,j}$ , 则  $I[p_{i,\psi,t,j} \leq \bar{p}_{i,\psi,t,j}] = 1$ , 反之则为 0。

计算各类 Copula 分布函数与经验 Copula 分布函数的欧氏距离之和  $d_k^2$ , 如式(10)所示。

$$d_k^2 = |C_e(F(p_{i,\psi,t}), F(p_{i,\psi,t+1})) - C_k(F(p_{i,\psi,t}), F(p_{i,\psi,t+1}))|^2 \quad (10)$$

选取与经验 Copula 分布函数在各样本点欧氏距离之和  $d_k^2$  最小的 Copula 分布函数类型作为最优的 Copula 分布函数, 至此得到  $t, t+1$  相邻时刻节点  $i$  下设备类型  $\psi$  有功功率相关性的 Copula 分布函数  $C(F(p_{i,\psi,t}), F(p_{i,\psi,t+1}))$ 。

2) 步骤 2 的计算流程。

生成  $t, t+1$  相邻时刻节点  $i$  下设备类型  $\psi$  有功功率联合概率密度函数  $f(p_{i,\psi,t}, p_{i,\psi,t+1})$ , 其表达式如式(11)所示。

$$f(p_{i,\psi,t}, p_{i,\psi,t+1}) = \frac{\partial C^2(F(p_{i,\psi,t}), F(p_{i,\psi,t+1}))}{\partial F(p_{i,\psi,t}) \partial F(p_{i,\psi,t+1})} = c(f(p_{i,\psi,t}), f(p_{i,\psi,t+1})) f(p_{i,\psi,t}) f(p_{i,\psi,t+1}) \quad (11)$$

式中: $c(f(p_{i,\psi,t}), f(p_{i,\psi,t+1}))$  为  $t, t+1$  相邻时刻节点  $i$  下设备类型  $\psi$  有功功率的相关性 Copula 密度函数。

由条件概率密度函数的定义公式, 结合式(11),

得到节点  $i$  下设备类型  $\psi$  基于当前时刻的下一时刻有功功率条件概率密度函数  $f(p_{i,\psi,t+1} | p_{i,\psi,t})$ , 其表达式如式(12)所示。

$$f(p_{i,\psi,t+1} | p_{i,\psi,t}) = \frac{f(p_{i,\psi,t}, p_{i,\psi,t+1})}{f(p_{i,\psi,t})} = \frac{c(f(p_{i,\psi,t}), f(p_{i,\psi,t+1})) f(p_{i,\psi,t+1})}{f(p_{i,\psi,t})} \quad (12)$$

已知节点  $i$  下设备类型  $\psi$  下一时刻有功功率波动量  $\Delta p_{i,\psi,t} = p_{i,\psi,t+1} - p_{i,\psi,t}$ , 由式(12)变形得到节点  $i$  下设备类型  $\psi$  下一时刻有功功率波动量基于当前时刻有功功率的条件概率密度函数  $f(\Delta p_{i,\psi,t} | p_{i,\psi,t})$ , 其表达式如式(13)所示。

$$f(\Delta p_{i,\psi,t} | p_{i,\psi,t}) = c(f(p_{i,\psi,t}), f(\Delta p_{i,\psi,t} + p_{i,\psi,t})) f(\Delta p_{i,\psi,t} + p_{i,\psi,t}) \quad (13)$$

根据连续型随机变量的期望值定义公式, 得到  $t$  时刻节点  $i$  下设备类型  $\psi$  下一时刻的有功功率波动量期望值  $E(\Delta p_{i,\psi,t})$ , 其表达式如式(14)所示。

$$E(\Delta p_{i,\psi,t}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta p_{i,\psi,t} f(\Delta p_{i,\psi,t} | p_{i,\psi,t}) d\Delta p_{i,\psi,t} \quad (14)$$

对节点  $i$  下设备类型  $\psi$  有功功率波动量期望值求和, 得到  $t$  时刻节点  $i$  有功功率波动量期望值  $\Delta p_{i,t}$ , 其表达式如式(15)所示。

$$\Delta p_{i,t} = \sum_{\psi} E(\Delta p_{i,\psi,t}) \quad (15)$$

## 1.2.2 基于关口功率波动程度评价指标的配电网灵活性评估流程

以配电网历史运行数据为样本, 从历史统计规律角度能够获取各节点有功功率、无功功率的预期波动量, 再结合该时刻下配电网潮流计算得到各节点有功功率、无功功率预期波动量对关口节点有功功率预期波动量的灵敏度矩阵, 得到关口功率波动程度评价指标, 完成基于关口功率波动程度评价指标的配电网灵活性评估, 评估流程如附录 A 图 A1 所示。

## 2 灵活型资源安装位置选择方法

本文将灵活型资源分为可控制型分布式发电类资源、储能类资源、综合能源系统、上级电网四大类。为了减少本级配电网系统对上级电网灵活性供给的依赖, 需要在对关口节点功率波动影响程度较大的节点处配置前 3 类灵活型资源, 本文称为分散式灵活型资源。为此, 本文定义节点  $i$  的有功功率波动量对关口节点有功功率波动量的影响指标  $I_i^p$  来定量衡量这种影响程度, 如式(16)所示。

$$I_i^p = \sum_{s=1}^U t^s \sum_{t \in T} F_t^{s,p} M_{p,i,t}^s \quad (16)$$

式中: $U$  为根据全规划年历史数据划分的典型场景日总数;  $t^s$  为某场景日  $s$  在规划年中的总天数;  $M_{p,i,t}^s$

为某场景日  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  有功功率波动量对关口节点有功功率波动量的灵敏度因子,为通过式(4)计算的某场景日  $s$  下  $t$  时刻各节点有功功率、无功功率预期波动量对关口节点有功功率波动量的灵敏度矩阵  $M_i^s$  中的第  $i$  个元素;  $T$  为时间尺度。

需要指出的是,为了根据配电网全规划年历史运行数据划分典型场景日,本文参考文献[16]中的分层聚类算法首先对可再生能源出力和负荷历史样本数据进行聚类分析;然后采用类间样本离差平方和作为聚类数的判定依据,实现样本的有效划分;最后根据样本曲线的波动大小、密集程度等特征选取峰谷差最大的样本作为典型场景日的输出,从而使得典型场景日的可再生能源出力与负荷变化能最大限度地描述规划期内场景的波动程度,并获得最大的规划裕度。

### 3 计及上级电网灵活性供给辅助服务费用的配电网灵活型资源优化配置模型

国家发展和改革委员会在2019年10月21日发布的第1658号文件《国家发展和改革委员会关于深化燃煤发电上网电价形成机制改革的指导意见》中表示,将完善辅助服务电价形成机制,会向配电网收取灵活调节辅助服务的相关费用。本文将配电网灵活型资源主动调节和被动弃风弃光、弃负荷调整后的关口功率波动程度作为配电网对上级电网的灵活性需求,通过配电网对上级电网灵活性需求和上级电网灵活性供给能力之间的平衡博弈,建立考虑上级电网灵活性辅助服务费用的灵活型资源优化配置模型,从而在第2节确定的安装位置处对灵活型资源配置容量进行优化,以获得灵活型资源优化配置方案。

#### 3.1 目标函数

以配电网灵活型资源年投资费用和年运行费用之和最小为目标函数,如式(17)所示。

$$\min f = C_{\text{con}} + C_{\text{run}} \quad (17)$$

式中:  $C_{\text{con}}$  为年投资费用;  $C_{\text{run}}$  为年运行费用。

$$C_{\text{con}} = \sum_{i=1}^n \sum_{\varphi \in w} \frac{r(1+r)^{e_{\varphi}}}{(1+r)^{e_{\varphi}} - 1} C_{i,\varphi} S_{i,\varphi} \quad (18)$$

式中:  $w = \{G, E, R\}$  为分散式灵活型资源集合,  $G, E, R$  分别代表可控制型分布式发电类资源、储能类资源和用户综合能源系统;  $r$  为贴现率;  $e_{\varphi}$  为第  $\varphi$  类分散式灵活型资源的使用寿命;  $C_{i,\varphi}$  为节点  $i$  第  $\varphi$  类分散式灵活型资源运行费用;  $S_{i,\varphi}$  为节点  $i$  第  $\varphi$  类分散式灵活型资源的安装容量。

$$C_{\text{run}} = C_T + C_C + C_E + C_R + C_B \quad (19)$$

式中:  $C_T$  为从上级电网购电费用和购买灵活性辅助服务费用,即上级电网运行备用费用;  $C_C$  为可控制

型分布式发电类资源运行费用;  $C_E$  为储能类资源运行费用;  $C_R$  为用户综合能源系统的补偿费用;  $C_B$  为弃风弃光、弃负荷惩罚费用。

上级电网运行备用费用  $C_T$  的表达式如式(20)所示。

$$C_T = \sum_{s=1}^U t^s \sum_{t \in T} (\lambda_T P_{T,t}^s \Delta t + f_T(\gamma_{T,t}^s)) \quad (20)$$

式中:  $\lambda_T$  为购电电价;  $P_{T,t}^s$  为某场景日  $s$  下  $t$  时刻与上级电网交互功率;  $\Delta t$  为时间间隔;  $f_T(\cdot)$  为购买上级电网灵活性辅助服务的费用函数;  $\gamma_{T,t}^s$  为某场景日  $s$  下  $t$  时刻配电网对上级电网灵活性服务的需求,其表达式如式(21)所示。

$$\gamma_{T,t}^s = M_i^s \begin{bmatrix} \Delta P_t^s \\ \Delta Q_t^s \end{bmatrix} - M_i^s \begin{bmatrix} \gamma_t^s \\ H' \gamma_t^s \end{bmatrix} - M_i^s \begin{bmatrix} P_{B,t}^s \\ H' P_{B,t}^s \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中:  $\gamma_t^s$  为某场景日  $s$  下  $t$  时刻各节点灵活型资源有功功率灵活性服务供给量矩阵;  $P_{B,t}^s$  为某场景日  $s$  下  $t$  时刻各节点弃风弃光、弃负荷的有功功率矩阵;  $H'$  为功率因数角的正切值对角矩阵,其表达式如式(22)所示。

$$H' = \text{diag}[\tan \sigma_1, \tan \sigma_2, \dots, \tan \sigma_n] \quad (22)$$

式中:  $\sigma_i$  为节点  $i$  的功率因数角。

分散式灵活型资源的运行费用  $C_{\varphi}$  的表达式如式(23)所示。

$$C_{\varphi} = \sum_{s=1}^U t^s \sum_{i=1}^n \sum_{t \in T} (\lambda_{\varphi} P_{i,\varphi,t}^s \Delta t + f_{\varphi}(\gamma_{i,\varphi,t}^s)) \quad (23)$$

式中:  $\lambda_{\varphi}$  为第  $\varphi$  类分散式灵活型资源的运行成本;  $P_{i,\varphi,t}^s$  为某场景日  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  第  $\varphi$  类分散式灵活型资源的有功功率;  $f_{\varphi}(\cdot)$  为第  $\varphi$  类分散式灵活型资源辅助服务费用函数,其表达式参见文献[17];  $\gamma_{i,\varphi,t}^s$  为某场景日  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  第  $\varphi$  类分散式灵活型资源提供的灵活性供给量。

弃风弃光、弃负荷惩罚费用  $C_B$  的表达式如式(24)所示。

$$C_B = \sum_{s=1}^U t^s \sum_{i=1}^n \sum_{t \in T} \lambda_B P_{i,B,t}^s \Delta t \quad (24)$$

式中:  $\lambda_B$  为单位弃风弃光、弃负荷惩罚费用;  $P_{i,B,t}^s$  为某场景日  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  弃风弃光、弃负荷功率。

#### 3.2 约束条件

有功功率平衡约束的表达式如式(25)所示。

$$(1+\alpha) \sum_{i=1}^n \left( P_{i,M,t}^s + \sum_{\varphi \in w} P_{i,\varphi,t}^s \right) = P_{T,t}^s \quad (25)$$

式中:  $\alpha$  为配电网系统的网损率;  $P_{i,M,t}^s$  为某场景日  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  的负荷值;  $P_{i,\varphi,t}^s$  为某场景日  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  第  $\varphi$  类灵活型资源的有功功率值。

线路传输容量约束的表达式如式(26)所示。

$$-f_{l,\text{lim}} \leq g_{l,i} \left( P_{i,M,t}^s + \sum_{\varphi \in w} P_{i,\varphi,t}^s \right) \leq f_{l,\text{lim}} \quad (26)$$

式中:  $f_{l, \text{lim}}$  为线路  $l$  的功率传输容量限值;  $g_{l, i}$  为节点  $i$  到线路  $l$  的功率转移分布因子。

上级电网传输功率约束的表达式如式(27)所示。

$$\begin{cases} P_{T, t+1} - P_{T, t} \leq \gamma_{T, t} & \gamma_{T, t} > 0 \\ P_{T, t} - P_{T, t+1} \leq -\gamma_{T, t} & \gamma_{T, t} \leq 0 \\ -P_{T, \min} \leq P_{T, t+1} \leq P_{T, \max} \\ -\gamma_{T, t}^- \leq \gamma_{T, t} \leq \gamma_{T, t}^+ \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $P_{T, t}$ 、 $P_{T, t+1}$  分别为  $t$  时刻和  $t+1$  时刻上级电网向配电网传输的功率;  $P_{T, \min}$ 、 $P_{T, \max}$  分别为上级电网向配电网传输的最小功率和最大功率;  $\gamma_{T, t}$  为  $t$  时刻上级电网向配电网提供的有功功率, 根据式(21)计算得到, 表示配电网对上级电网灵活性服务的需求量, 通过配电网对上级电网灵活性服务的需求量满足上级电网的灵活性供给量, 进而满足配电网对可再生能源与负荷波动的消纳;  $\gamma_{T, t}^-$ 、 $\gamma_{T, t}^+$  分别为  $t$  时刻上级电网向下灵活性供给量和向上灵活性供给量, 其表达式如式(28)所示。

$$\begin{cases} \gamma_{T, t}^- = \min(R_T^- \Delta t, P_{T, t} - P_{T, \min}) \\ \gamma_{T, t}^+ = \min(R_T^+ \Delta t, P_{T, \max} - P_{T, t}) \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $R_T^-$ 、 $R_T^+$  分别为上级电网向下和向上最大功率调整率。

分散式灵活型资源灵活性供给约束的表达式如式(29)所示。

$$\begin{cases} P_{i, \varphi, t+1} - P_{i, \varphi, t} \leq \gamma_{i, \varphi, t} & \gamma_{i, \varphi, t} > 0 \\ P_{i, \varphi, t} - P_{i, \varphi, t+1} \leq -\gamma_{i, \varphi, t} & \gamma_{i, \varphi, t} \leq 0 \\ P_{i, \varphi, \min} \leq P_{i, \varphi, t+1} \leq P_{i, \varphi, \max} \\ -\gamma_{i, \varphi, t}^- \leq \gamma_{i, \varphi, t} \leq \gamma_{i, \varphi, t}^+ \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $P_{i, \varphi, t}$ 、 $P_{i, \varphi, t+1}$  分别为  $t$ 、 $t+1$  时刻节点  $i$  第  $\varphi$  类分散式灵活型资源的有功功率;  $\gamma_{i, \varphi, t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  第  $\varphi$  类分散式灵活型资源的有功功率灵活性服务供给功率;  $P_{i, \varphi, \max}$ 、 $P_{i, \varphi, \min}$  分别为节点  $i$  第  $\varphi$  类分散式灵活型资源的有功功率上限值和下限值;  $\gamma_{i, \varphi, t}^-$ 、 $\gamma_{i, \varphi, t}^+$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  第  $\varphi$  类分散式灵活型资源提供的下调有功功率灵活性供给量和上调有功功率灵活性供给量, 对于可控制型分布式发电类资源和用户综合能源系统2类分散式灵活型资源, 计算公式如式(30)所示。

$$\begin{cases} \gamma_{i, \varphi, t}^- = \min(R_{i, \varphi}^- \Delta t, P_{i, \varphi, t} - P_{i, \varphi, \min}) \\ \gamma_{i, \varphi, t}^+ = \min(R_{i, \varphi}^+ \Delta t, P_{i, \varphi, \max} - P_{i, \varphi, t}) \end{cases} \quad \varphi \in \{G, R\} \quad (30)$$

式中:  $R_{i, \varphi}^-$ 、 $R_{i, \varphi}^+$  分别为节点  $i$  第  $\varphi$  类分散式灵活型资源的下调爬坡率和上调爬坡率。

对于储能类分散式灵活型资源,  $\gamma_{i, E, t}^-$ 、 $\gamma_{i, E, t}^+$  的表达式如式(31)所示。

$$\begin{cases} \gamma_{i, E, t}^- = \min \left[ P_{i, E, \max}^{\text{ch}} + P_{i, E, t}, \frac{S_{i, E} (Q_{\text{SOCi, E, max}} - Q_{\text{SOCi, E, t}})}{\eta_{i, E}^{\text{dis}} \Delta t} + P_{i, E, t} \right] \\ \gamma_{i, E, t}^+ = \min \left[ P_{i, E, \min}^{\text{dis}} - P_{i, E, t}, \frac{S_{i, E} \eta_{i, E}^{\text{ch}} (Q_{\text{SOCi, E, t}} - Q_{\text{SOCi, E, min}})}{\Delta t} - P_{i, E, t} \right] \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $P_{i, E, t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  储能类设备的有功功率值;  $\eta_{i, E}^{\text{ch}}$ 、 $\eta_{i, E}^{\text{dis}}$  分别为节点  $i$  储能类设备的充电效率和放电效率;  $Q_{\text{SOCi, E, t}}$  为  $t$  时刻节点  $i$  储能类设备的荷电状态;  $Q_{\text{SOCi, E, min}}$ 、 $Q_{\text{SOCi, E, max}}$  分别为节点  $i$  储能类设备的荷电状态最小值和最大值。

荷电状态约束的表达式如式(32)所示。

$$\begin{cases} Q_{\text{SOCi, E, min}} \leq Q_{\text{SOCi, E, t}} \leq Q_{\text{SOCi, E, max}} \\ Q_{\text{SOCi, E, t+1}} = Q_{\text{SOCi, E, t}} + (\eta P_{i, E, t}^{\text{ch}} - P_{i, E, t}^{\text{dis}} / \eta) \Delta t / S_{i, E} \end{cases} \quad (32)$$

式中:  $\eta$  为充放电系数;  $S_{i, E}$  为节点  $i$  储能类设备的额定容量;  $P_{i, E, t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{i, E, t}^{\text{dis}}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  储能类设备的充电功率和放电功率。

#### 4 基于遗传算法的配电网灵活型资源优化配置方法

采用基于遗传算法的优化方法求解第3节的灵活型资源优化配置模型, 结合第2节的灵活型资源安装位置选择方法, 形成配电网灵活型资源优化配置详细流程, 见附录A图A1。主要分为以下3个关键步骤: 首先, 根据配电网规划年内可再生能源出力与负荷样本数据进行聚类分析划分典型场景, 并根据典型场景日数据计算关口功率波动程度评价指标; 其次, 在规划年内计算得到各节点对关口节点功率波动的影响指标  $I_t^i$ , 通过对该指标排序确定灵活型资源的安装节点位置; 最后, 在MATLAB平台使用优化工具箱基于遗传算法求解灵活型资源优化配置模型, 优化得到各类型灵活型资源在安装节点处的安装容量, 最终输出各类型灵活型资源的安装位置和安装容量, 以及年投资费用和年运行费用。

#### 5 算例分析

为验证本文所提出的配电网灵活型资源优化配置方法, 以天津某区域35 kV实际配电网为例开展仿真分析。仿真验证计算分为3组: ①各节点对关口节点功率波动的影响指标计算及灵活型资源安装节点选择方法验证; ②计及灵活性辅助服务费用的灵活型资源安装容量优化计算方法验证; ③以阴雨日典型场景为例进行生产模拟计算验证灵活型资源配置结果的优势效果。

## 5.1 系统基本资料

该区域配电网网络拓扑分析后得到包含 26 个节点的拓扑结构图如附录 A 图 A2 所示,其中在节点 3、23 和节点 11 处分别建有 10、5 MW 的光伏电站和 5 MW 的风电场,此外,在节点 8 处有一个综合能源系统用户,通过调控可以向配电网提供灵活性服务支持。

以微型燃气轮机、储能电池分别作为可控制型分布式发电类设备和储能类设备的代表,对该含可再生能源配电网进行灵活型资源规划,单位规划容量为 100 kW。通过调研常规微型燃气轮机、储能电池设备相关参数情况,以及该区域节点 8 处综合能源系统用户实际情况,得到各灵活型资源相关参数如附录 A 表 A1 所示。购电费用采用 35 kV 一般工商业平均电价 0.65 元 / (kW·h) 为固定电价,弃风弃光和弃负荷惩罚费用均为 1 元 / (kW·h)。另外,经历史资料统计分析,该地区全年中晴朗日约占 1/3,多云日约占 1/2,阴雨日约占 1/6。

## 5.2 计算结果与分析

### 5.2.1 灵活型资源安装位置选择结果

通过对该区域配电网历史样本数据的分析计算,得到各节点有功功率波动量对关口节点有功功率波动量的影响指标  $I_i^p$  分布图如图 1 所示。

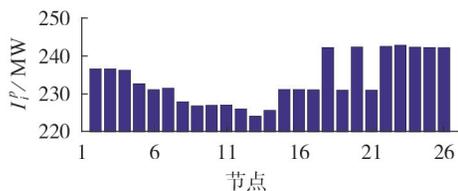


图 1 各节点有功功率波动量对关口节点有功功率波动量的影响指标  $I_i^p$  分布图

Fig.1 Distribution diagram of influence index  $I_i^p$  of active power fluctuation of each node on active power fluctuation of gate node

影响指标  $I_i^p$  越大表明该节点功率波动对关口功率波动影响越大,本文选择影响指标  $I_i^p$  排序最大的前 2 个节点(节点 22、23)作为该系统灵活型资源安装位置。

### 5.2.2 灵活型资源优化配置结果

基于本文构建的计及上级电网灵活性供给辅助服务费用的灵活型资源配置模型,采用遗传算法在前述安装位置处对灵活型资源配置容量进行优化,获得该配电网灵活型资源优化配置方案:节点 22 微型燃气轮机配置容量为 1 800 kW,储能电池配置容量为 800 kW·h;节点 23 微型燃气轮机配置容量为 3 000 kW,储能电池配置容量为 300 kW·h;节点 8 用户综合能源系统配置容量为 2 700 kW。计算得到年投资费用总费用为 437.63 万元。规划前、后年运行

费用对比结果如表 1 所示。

表 1 规划前、后年运行费用对比结果

Table 1 Comparison results of annual operating costs between before and after planning

规划情况	基本能量费用 / 万元	上级电网灵活性辅助服务费用 / 万元	惩罚费用 / 万元
规划前	11 657.06	353.53	520.09
规划后	11 435.14	81.08	0.34
规划情况	年运行总费用 / 万元	弃风弃光量 / (kW·h)	弃负荷量 / (MW·h)
规划前	12 530.65	2 010.99	3 189.94
规划后	11 516.56	2.04	1.34

由表 1 可以看出,尽管安装灵活型资源会产生 437.63 万元的安装费用,但是规划后年运行总费用比规划前节省 1 014.09 万元,其中基本能量费用(规划前为从上级电网购买基本电量的费用,规划后为该费用与另 3 类灵活型资源的运行费用之和)节省 221.92 万元,上级电网灵活性辅助服务费用节省 272.45 万元,由于弃风弃光以及弃负荷现象造成的惩罚费用减少 519.75 万元。由此可以看出,对高渗透率可再生能源配电网进行灵活型资源优化配置具有良好的经济运行效果。

对比规划前、后的弃风弃光量和弃负荷量可以看出,规划后相比规划前可以多消纳可再生能源 2 008.95 MW·h,同时减少弃负荷量 3 188.6 MW·h,能够有效提升可再生能源消纳量,提高供电可靠性,具有良好的社会效益。

### 5.2.3 阴雨日运行结果分析

根据获得的灵活型资源规划结果,对阴雨日运行状况进行生产模拟,各灵活型资源出力状况、荷电状态图如图 2 所示,规划前、后全天弃风弃光和弃负荷状况如图 3 所示,规划前、后关口节点有功功率波动状况如图 4 所示。

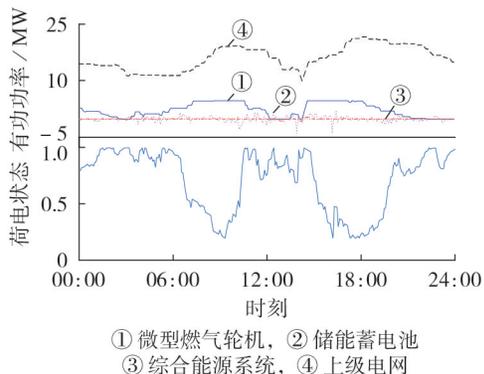


图 2 阴雨日各灵活型资源出力与全天储能系统荷电状态图

Fig.2 Diagram of various flexible resource output and all-day state of charge of energy storage system on cloudy and rainy days

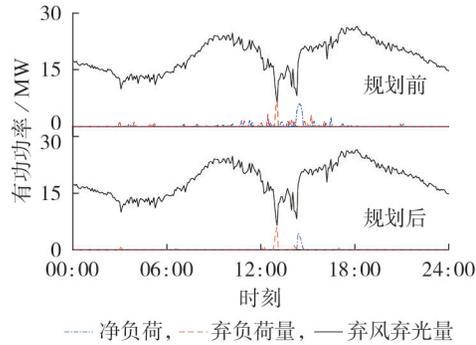


图3 规划前、后全天弃风弃光和弃负荷状况图

Fig.3 Diagram of abandoned wind, solar and load conditions throughout day before and after planning

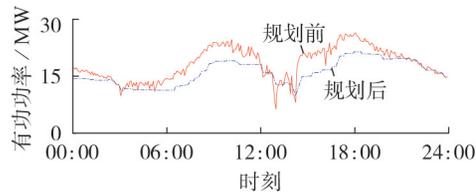


图4 规划前、后关口节点有功功率波动图

Fig.4 Diagram of active power fluctuation of gate node before and after planning

由运行结果可以看出,在安装灵活型资源后,上级电网主要承担基本能量供给的任务,各灵活型资源承担调节可再生能源和随机负荷产生的波动。其中微型燃气轮机和储能电池由于调节速率快、调节成本小,承担主要的调节作用,上级电网次之,当发生特别大的扰动时,用户综合能源系统配合调节,期间会有少量的弃风弃光和弃负荷现象。

对比规划前、后弃风弃光和弃负荷状况图3可以明显看出,加入微型燃气轮机、储能电池等分布式灵活型资源后可以明显加强对可再生能源和随机性负荷的消纳能力,有效减少弃风弃光和弃负荷情况的发生。

对比规划前、后关口节点有功功率波动图4可以看出,加入分布式灵活型资源可以削弱关口节点有功功率的波动,减少可再生能源和随机性负荷波动对上级电网造成的冲击影响。

## 6 结论

针对高渗透率可再生能源配电网中各节点短时间大幅功率波动造成的灵活性调节能力不足问题,为了减少配电网对上级电网灵活性供给的依赖,提出了基于关口功率波动程度评价指标的配电网灵活性评估方法,从而制定了基于节点功率对关口功率波动影响指标排序的灵活型资源安装位置选择方法,构建了计及上级电网灵活性辅助服务费用的灵活型资源优化配置模型。算例仿真结果表明:

1)本文所提出的灵活型资源优化配置方法能够

在对关口功率波动影响较大的敏感节点处给出灵活型资源配置方案,该方案能够有效降低上级电网灵活性辅助服务费用,从而降低配电网年总运行费用,同时提升可再生能源消纳量,提高系统供电可靠性;

2)所配置的分布式灵活型资源可以削弱配电网关口功率的波动程度,减少可再生能源和随机性负荷波动对上级电网造成的冲击影响,从而将灵活性供需平衡问题在配电网本级就地解决。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 张高航,李凤婷. 计及源荷储综合灵活性的电力系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):159-167.  
ZHANG Gaohang, LI Fengting. Day-ahead optimal scheduling of power system considering comprehensive flexibility of source-load-storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12):159-167.
- [2] 黄弦超,封钰. 考虑机组灵活性的独立微网日前日内协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):125-131.  
HUANG Xianchao, FENG Yu. Day-ahead and intra-day coordinated optimal scheduling of stand-alone microgrid considering unit flexibility[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4):125-131.
- [3] 边晓燕,孙明琦,许家玉,等. 计及灵活性储备的含风电多微电网系统分布式协调调控策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(8):47-54,104.  
BIAN Xiaoyan, SUN Mingqi, XU Jiayu, et al. Distributed coordinated dispatch and control strategy of multi-microgrid system with wind power considering flexibility reserve[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8):47-54, 104.
- [4] 马静洁,张少华,李雪,等. 发电系统充裕度与灵活性的随机评估[J]. 电网技术,2019,43(11):3867-3874.  
MA Jingjie, ZHANG Shaohua, LI Xue, et al. Stochastic assessment of adequacy and flexibility of power generation systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(11):3867-3874.
- [5] HOLTINEN H, TUOHY A, MILLIGAN M, et al. The flexibility workout: managing variable resources and assessing the need for power system modification[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2013, 11(6):53-62.
- [6] MA J, SILVA V, BELHOMME R, et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1):200-209.
- [7] 鲁宗相,李海波,乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):9-20.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):9-20.
- [8] ALIZADEH M I, PARSIA MOGHADDAM M, AMJADY N, et al. Flexibility in future power systems with high renewable penetration: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57:1186-1193.
- [9] 潘超,孟涛,蔡国伟,等. 广义电源多目标优化配置与运行[J]. 电网技术,2015,39(12):3505-3512.  
PAN Chao, MENG Tao, CAI Guowei, et al. Multi-objective optimal configuration and operation of generalized power sources[J]. Power System Technology, 2015, 39(12):3505-3512.
- [10] NICK M, CHERKAoui R, PAOLONE M. Optimal planning of distributed energy storage systems in active distribution net-

- works embedding grid reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1577-1590.
- [11] 叶瑞丽, 郭志忠, 刘瑞叶, 等. 基于置信区间估计及储能装置优化配置的风电场可靠出力研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 85-91.  
YE Ruili, GUO Zhizhong, LIU Ruiye, et al. Reliable power output based on confidence interval estimation and optimal ESS configuration of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 85-91.
- [12] 李翔宇, 赵冬梅. 计及可调资源动态特性的虚拟电厂多级优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 17-24.  
LI Xiangyu, ZHAO Dongmei. Multi-level optimal configuration of virtual power plant considering dynamic characteristics of adjustable resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 17-24.
- [13] 李阳, 郇嘉嘉, 曹华珍, 等. 基于综合能源协同优化的配电网规划策略[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1393-1400  
LI Yang, HUAN Jiajia, CAO Huazhen, et al. Distribution network planning strategy based on integrated energy collaborative optimization [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1393-1400 .
- [14] NIU H N, YANG L, ZHAO J X, et al. Flexible-regulation resources planning for distribution networks with a high penetration of renewable energy[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(18): 4099-4107.
- [15] RAYENS B, NELSEN R B. An introduction to copulas[J]. Technometrics, 2000, 42(3): 317.
- [16] 彭晨宇, 陈宁, 高丙团. 结合多重聚类和分层聚类的超短期风电功率预测方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 172-179.  
PENG Chenyu, CHEN Ning, GAO Bingtuan. Ultra-short-term wind power forecasting method combining multiple clustering and hierarchical clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 172-179.
- [17] 肖定焱, 王承民, 曾平良, 等. 考虑短时灵活性需求及资源调用成本的灵活性资源优化调度[J]. 华东电力, 2014, 42(5): 809-815.  
XIAO Dingyao, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. Flexibility resource optimization dispatch considering short-term flexibility demand and invoking cost [J]. East China Electric Power, 2014, 42(5): 809-815.

#### 作者简介:



牛焕娜

牛焕娜(1976—),女,北京人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、微电网技术、配电网自动化(E-mail: nhn@cau.edu.cn);

钱立(1995—),男,湖北随州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化与控制等(E-mail: 986826882@qq.com);

杨璐(1992—),男,山西长治人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统规划、电力系统运行与控制(E-mail: 1036909083@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

## Optimal allocation of flexible resources in distribution network considering cost of flexible auxiliary services

NIU Huanna<sup>1</sup>, QIAN Li<sup>1</sup>, YANG Lu<sup>1,2</sup>, WANG Kun<sup>3</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Economy Research Institute, Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of insufficient flexible adjustment capacity of distribution network caused by large power fluctuation of high-permeability renewable energy in a short time, in order to reduce the dependence of the distribution network on the flexible supply provide by the upper-level power grid, a flexible resource optimal allocation method is proposed, which takes into account the flexibility auxiliary service fees of the upper-level power grid. The evaluation index of gate power fluctuation degree is defined, which represents the flexibility level of distribution network. Based on the Copula theory, the evaluation method of distribution network flexibility is formulated, and the installation location selection method of flexible resources is proposed based on the ranking index of influence of node power on gate power fluctuation. For the future power market scenarios, based on the balance game between the distribution network's flexible demand for the upper-level power grid and the flexible supply capacity of the upper-level power grid, and combined with the flexible supply constraints of various types of flexible resource equipment, a flexible resource optimal allocation model including the flexibility auxiliary service fees of the upper-level power grid is constructed. Distribution network example simulative results show that the proposed flexible resource allocation method can effectively reduce the total annual operating cost of distribution network, improve the consumption of renewable energy and the power supply reliability of the distribution network system, weaken the degree of gate power fluctuation, so as to reduce the impact of renewable energy and random load fluctuation on the upper-level power grid.

**Key words:** distribution network; flexibility assessment; flexible resources; auxiliary service fees; optimal allocation

## 附录 A

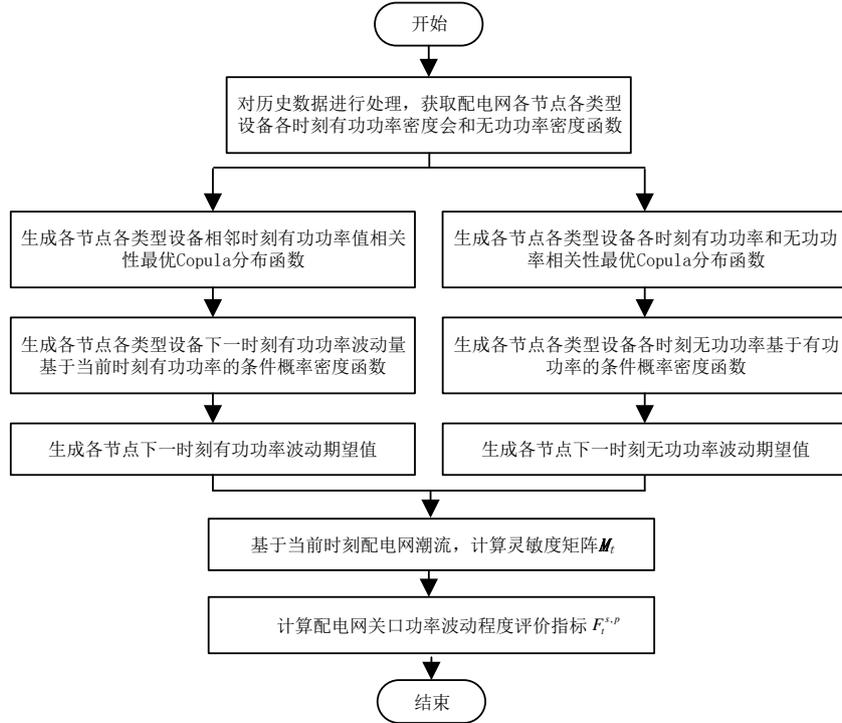


图 A1 基于关口功率波动程度评价指标的配电网灵活性评估方法流程图

Fig.A1 Flowchart of distribution network flexibility evaluation method based on gate power fluctuation degree evaluation index

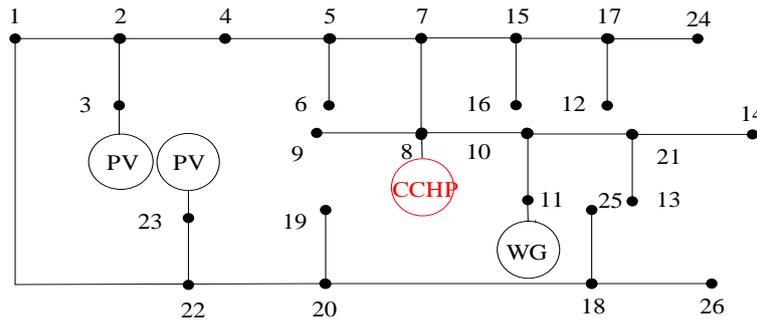


图 A2 配电网系统结构图

Fig.A2 System structure of distribution network

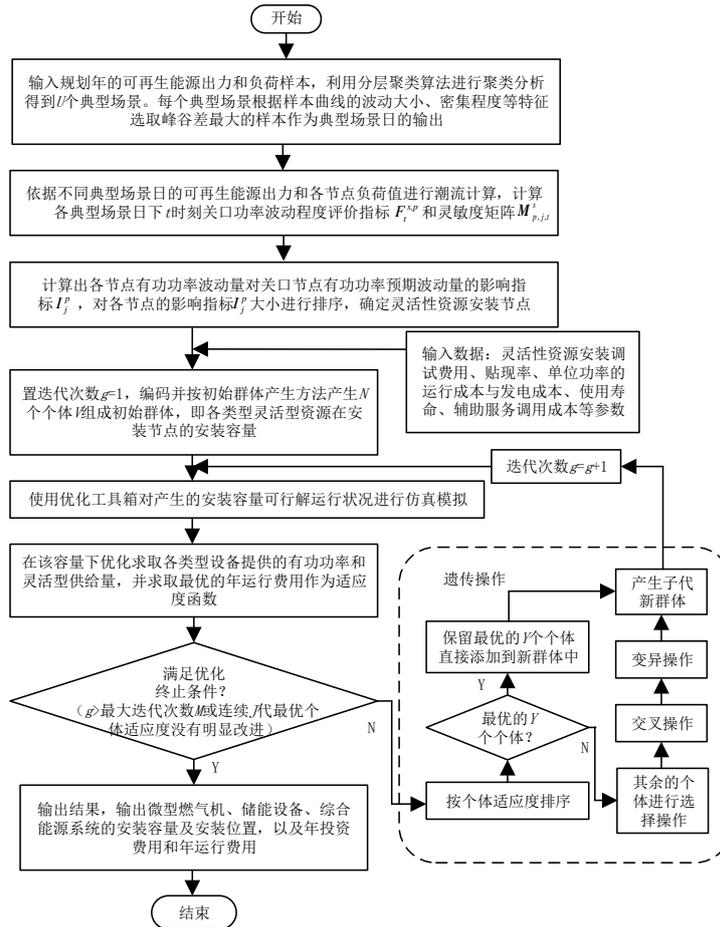


图 A3 基于遗传算法的配电网灵活型资源优化配置流程

Fig.A3 Flowchart of flexible resource optimal allocation of distribution network based on genetic algorithm

表 A1 灵活型资源相关参数

设备类型	内容	数值
微型燃气轮机	安装调试费用	8 840 元/kW
	维护管理费用	0.03 元/kW
	发电成本	0.49 元/ (kW h)
	使用寿命	20 a
	贴现率	8%
储能电池	电池成本	553 元/ (kW h)
	电池效率	92%
	放电深度	80%
	使用寿命	2 a
用户区域综合能源系统	最大容量为	5 000 kW
	最大升负荷率	50 kW/min
	辅助服务调用成本	0.7 元/ (kW h)